

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ARAYÜZEY TABAKALI METAL-YARIİLETKEN (MS) YAPILARIN
HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIK VE
FREKANSA BAĞLI İNCELENMESİ**

Aysun ARSLAN ALSAÇ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ARAYÜZEY TABAKALI METAL-YARIİLETKEN (MS) YAPILARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIK VE FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ

Aysun ARSLAN ALSAÇ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tülay SERİN

Bu çalışmada Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si ve Al/PVA- ZnS/p-Si metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapıların akım iletim mekanizmaları (CCMs), sıcaklığa bağlı düz beslem akım-voltaj (I-V) ölçümlerinden yararlanılarak incelenmiştir. CCMs belirlemek için yapıların I₀ doyma akımı, Φ_{B0} sıfır beslem bariyer yüksekliği n ideallik faktörü gibi elektriksel parametreleri sıcaklığa bağlı olarak belirlenmiştir. Φ_{B0} ve n'nin sıcaklığa bağlılığından metal ile yarıiletken arasında çift gaussian dağılımlı (DGD) bariyer yüksekliğinin varlığı tespit edilmiştir. Sıfır beslem bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla doğru, idealite faktörünün ise ters orantılı davranış sergilediği tespit edilmiştir. Modifiye edilmiş Richardson çizimlerinden Φ_{B0} ve A* değerleri Al/PVA- ZnS/p-Si yapısı için yüksek sıcaklık bölgesinde 0.95eV ve 31.64 A/cm²K² olarak, düşük sıcaklık bölgesinde de 0.3871eV ve 20.996 A/cm²K² olarak bulunmuştur. Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si yapısı içinse yüksek sıcaklık bölgesinde 1.06 eV ve 115.86 A/cm²K² olarak, düşük sıcaklık bölgesinde de 1.02 eV ve 77.21 A/cm²K² olarak bulunmuştur. Yüksek sıcaklık bölgesinde A* için bulunan sonuçların p ve n tipi silikonun teorik değerlerine çok yakın çıkması yapılarda akım iletim mekanizmasının DGD'yle açıklanabileceğini doğrulamaktadır. Ayrıca, Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) yapının dielektrik özellikleri dielektrik sabiti, kayıp tanjant, elektrik modülünün gerçek ve sanal kısımları ve elektrik iletkenlik parametreleri, 0.1 kHz - 1 MHz frekans aralığında, oda sıcaklığında incelenmiştir.

Temmuz 2022, 97 sayfa

Anahtar Kelimeler: Akım-iletim mekanizmaları, yüzey durumlarının sıcaklığa bağlılığı, arayüzey durumları, seri direnç, frekansa bağlı dielektrik karakteristikler.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

PREPARATION OF INTERFACE LAYER METAL-SEMICONDUCTOR (MS) STRUCTURES AND ANALYSIS OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS DEPENDING ON TEMPERATURE AND FREQUENCY

Aysun ARSLAN ALSAÇ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Tülay SERİN

In this study, the current conduction mechanisms (CCMs) of Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si and Al/PVA-ZnS/p-Si metal-polymer-semiconductor (MPS) structures were investigated by using temperature-dependent direct voltage current-voltage (I-V) measurements. . In order to determine CCMs, electrical parameters such as I_0 saturation current, Φ_{B0} zero feed barrier height n ideality factor were determined depending on the temperature. Due to the temperature dependence of Φ_{B0} and n , the existence of a double gaussian distribution (DGD) barrier height between metal and semiconductor was determined. It has been determined that the zero-feed barrier height is directly proportional to the temperature and the ideality factor is inversely proportional to the temperature. The Φ_{B0} and A^* values from the modified Richardson drawings were found to be 0.95eV and 31.64 A/cm²K² in the high temperature region for the Al/PVA-ZnS/p-Si structure, and 0.3871eV and 20,996 A/cm²K² in the low temperature region. For the Au/PVA-Fe₃O₄/n-structure, it was found to be 1.06 eV and 115.86 A/cm²K² in the high temperature region, and 1.02 eV and 77.21 A/cm²K² in the low temperature region. The results found for A^* in the high temperature region are very close to the theoretical values of p and n type silicon, confirming that the current conduction mechanism in structures can be explained by DGD. In addition, the dielectric properties of the Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) structure are the dielectric constant, the loss tangent, the real and imaginary parts of the electrical module and electrical conductivity parameters were investigated in the frequency range of 0.1 kHz - 1 MHz, at room temperature.

July 2022, 97 pages

Key Words: Current-conduction mechanisms, dependence of surface states on temperature, interface states, serial resistance, frequency dependent dielectric characteristics.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince, beni yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında engin bilgi ve deneyimlerini paylaşarak katkıda bulunan danışman hocam Prof. Dr. Tülay SERİN'e (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), hem tezin tamamlanmasına hem de tez ile ilgili yayınların hazırlanmasına büyük katkı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a (Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Anabilim Dalı) doktora eğitimim süresince, her türlü desteğini gördüğüm hep yanımda olan Prof. Dr. Beyza LİŞESİVDİN'e (Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Anabilim Dalı), tez izleme komitesindeki öneri ve katkılarından ötürü Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), rahmetle andığım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Necmi SERİN'e (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım boyunca her türlü fedakarlık göstererek yanımda olan canım annem Nuriye ARSLAN, canım babam Turgut ARSLAN, beni sürekli motive eden canım kardeşim Ezgi ARSLAN, değerli eşim Ümit ALSAÇ ve biricik kızım Elif ALSAÇ'a en içten duygularımla teşekkür ederim.

Aysun ARSLAN ALSAÇ
Ankara, Temmuz 2022

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİN.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	6
2.1 Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar.....	6
2.2 n-Tipi MS Kontaklar	7
2.3 p-Tipi MS Kontaklar	10
2.4 Metal-Yarıiletken ve Metal-Polimer-Yarıiletken Yapılarda Arayüzey Durumları	12
2.5 İdeal Metal-Yalıtkan/Polimer-Yarıiletken Kontaklar.....	14
2.6 Metal – Yalıtkan / Polimer - Yarıiletken Yapıların Akım – Gerilim – Sıcaklık Belirtgenleri	15
2.6.1 Termoiyonik Emisyon Teorisi.....	18
2.6.2 Gaussian Engel Dağılımı Modeli.....	21
2.7 Yapıların Kapasite – Gerilim (C-V) Karakteristikleri	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	29
3.1 PVA'nın Temel Nitelikleri.....	29
3.2 Çinko Sülfür (ZnS) Bileşiğinin Temel Özellikleri	30
3.3 Silisyumun (Si) Temel Özellikleri.....	31
3.4 Sol-Jel Daldırma Yöntemi	33
3.5 Alt Tabakaların Temizlenmesi	34
3.6 ZnS-PVA Çözeltisinin Hazırlanışı ve Doğrultucu Kontakların Yapımı	35
3.7 Kullanılan Cihazlar.....	38
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	41
4.1 Akım-Gerilim (I-V) Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Belirlenmesi.....	42
4.1.1 Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si (MPS) diyotlar	42

4.1.2 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) yapılar.....	62
4.2 Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerin Frekansa Bağlı Olarak İncelenmesi	69
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	81
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ.....	97



SİMGELER DİZİNİ

A	Diyot alanı
Al	Alüminyum
A^*	Etkin Richardson sabiti
$\text{\AA}$	Angström
cm	Santimetre
C	Sığa
C_{HF}	Yüksek frekanstaki kapasite
C_{LF}	Düşük frekanstaki kapasite
d_i/δ	Arayüzey tabakanın kalınlığı
e	Elektronun yükü
eV	Elektron volt
$E (V/m)$	Elektrik alan
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_f	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji bant aralığı
$f(E)$	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
h	Planck sabiti
k	Boltzmann sabiti
q	Elektrik yükü
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Kısa devre direnci
$\Delta\Phi$	Schottky engel düşmesi
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
m_h^*	Değişin etkin kütlesi
m_0	Elektronun durgun kütlesi
M^*	Kompleks elektrik modulus
M'	Elektrik modülülüsün reel kısmı
M''	Elektrik modülülüsün sanal kısmı

$N(E)$	Bantlardaki durumların yoğunluğu
n	İdealite faktörü
N_A	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_v	Valans bandındaki durumların yoğunluğu
N_c	İletim bandındaki durumların yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durumların yoğunluğu
T	Sıcaklık
$\tan\delta$	Tanjant kayıp
W_D	Tüketim bölgesinin kalınlığı
τ (sn)	Ara-yüzey tuzaklarının ömrü
ω	Açısal frekans
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ^*	Kompleks dielektrik sabiti
ϵ'	Dielektrik sabitinin reel kısmı
ϵ''	Dielektrik sabitinin sanal kısmı
Φ_{B0}	Sıfır beslem bariyer yüksekliği
Φ_e	Etkin engel yüksekliği

Kısaltmalar

C-V	Kapasitans-voltaj
DGD	Double (çift) Gaussian dağılım
FE	Alan emisyonu
GD	Gaussian dağılım
G/ω -V	İletkenlik-voltaj
p-Si	p-tipi Silisyum
PVA	Polivinil alkol

SD	Schottky diyet
SBD	Schottky bariyer diyet
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum di-oksit
TE	Termiyonik Emisyon
TFE	Termiyonik Alan Emisyonu
ZnS	Çinko sülfür
MS	Metal-yarıiletken
MIS	Metal-yalıtkan-yarıiletken
MPS	Metal-Polimer-Yarıiletken

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 M/S (n-tipi) doğrultucu (Schottky) yapının enerji-bant diyagramı: a)Kontak alınmadan önce b)Kontak alındıktan sonra c)Negatif gerilimde d)Pozitif gerilimde	8
Şekil 2.2 M/S (n-tipi) omik (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı a)Kontak yapılmadan b)Kontaktan yapılınc, c)Negatif gerilimde d)Pozitif gerilimde	9
Şekil 2. 3 (a) M/S (p-tipi) doğrultucu yapının enerji-bant gösterimi (a)Kontak alınmadan önce (b)Kontak alındıktan sonra (c)Gerilim sıfırdan farklı iken.....	11
Şekil 2.4 MS ile MIS yapının a) Şematik çizimi b) eşdeğer devresi seri direnç (R_s) ve paralel direnç (R_{sh})	13
Şekil 2.5 İdeal durumda MIS/MPS yapıda a) p- ve b) n-tipi yarıiletken	14
Şekil 2.6 TE teorisine göre taşıyıcıların bariyer üstünden geçişi.....	16
Şekil 2.7 Temel akım-iletim türlerinin idealite faktörüne göre değişimi.....	17
Şekil 2.8 (a) Polar olmayan moleküller ve (b) Polar moleküllerin kutuplanması.....	27
Şekil 3.1 PVA sentez reaksiyonu ve atom dizilimi	29
Şekil 3.2 Çinko sülfür (ZnS) kristal yapısının birim hücresi	31
Şekil 3.3 Silisyum (Si) kristalinin 3D kafes yapısı	32
Şekil 3.4 Sol-Jel Daldırma Yöntemi Aşamaları	34
Şekil 3.5 ZnS-PVA etkileşiminin şematik gösterimi	36
Şekil 3.6 Çözelti hazırlama aşamaları	37
Şekil 3.7 Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotların diyagramı	38
Şekil 3.8 Elektrik ölçümlerinin yapıldığı sistem.....	39
Şekil 3.9 Hassas elektriksel empedans çözümleyici	40
Şekil 4.1 Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si (MPS) yapılarda yarı-logaritmik $\ln I-V$ belirtkenleri	42
Şekil 4.2 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotunda idealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin sıcaklığa göre değişimi	45
Şekil 4.3 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun $n-1000/T$ grafiği.....	47
Şekil 4.4 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun $n-1000/T$ grafiği.....	48
Şekil 4.5 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun n - T grafiği.....	49
Şekil 4.6 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotunun $\Phi_{B0} - n$ grafiği.....	50
Şekil 4.7 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlarda 60 -320 K aralığında $\Phi_{ap} - q/2kT$	52
Şekil 4.8 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlarda 60 -320 K aralığında $n^{-1}-1 - q/2kT$	53

Şekil 4.9 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda $\ln(I_0/T^2) - q/kT$ grafiği	55
Şekil 4.10 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun modifiye Richardson grafiği	56
Şekil 4.11 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda $N_{ss} - (E_c - E_{ss})$ grafiği	58
Şekil 4.12 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlarda $\ln R_i - V$ değişimi	59
Şekil 4.13 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda $\ln I - V$ değişimi	60
Şekil 4.14 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda n ve Φ_{B0} 'ın sıcaklığa göre değişimi	62
Şekil 4.15 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda $n_{tun} - T$ grafiği	63
Şekil 4.16 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda $\Phi_{B0} - n$ değişimi	64
Şekil 4.17 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda $\Phi_{B0} - q/2kT$ grafiği	65
Şekil 4.18 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda $(n^{-1} - 1) - q/2kT$ grafiği	66
Şekil 4.19 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda modifiye Richardson değişimi ..	67
Şekil 4.20 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda N_{ss} vs $E_c - E_{ss}$ değişimi	68
Şekil 4.21 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda $C(F) - V$ değişimi	69
Şekil 4.22 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotun $G/\omega - V$ grafikleri	71
Şekil 4.23 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda $1/C^2 - V$ değişimi	72
Şekil 4.24 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda dielektrik sabiti (ϵ')'nün oda sıcaklığında voltaja göre değişim grafiği	75
Şekil 4.25 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda dielektrik kayıp (ϵ'')'nün oda sıcaklığında voltaja göre değişim grafiği	76
Şekil 4.26 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda oda sıcaklığında $\tan\delta - V$ grafiği	77
Şekil 4.27 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda farklı frekanslarda $M' - V$ grafiği	78
Şekil 4.28 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda oda sıcaklığında elektrik modülünün imajiner M'' parametresinin farklı frekanslarda gerilime göre grafiği	79
Şekil 4. 29 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi diyotlarda $R_s - V$ değişimi	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Yarıiletken tipine göre arayüzey durumlarının oluşturduğu tuzaklar	13
Çizelge 3.1 Silisyumun bazı özellikleri	33
Çizelge 4.1 Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun 60-320 K sıcaklık aralığındaki akım-gerilim (I-V) belirtkenleri.....	44
Çizelge 4.2 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi Schottky diyotun 80-320 K sıcaklık aralığındaki akım-gerilim (I-V) belirtkenleri	61
Çizelge 4.3 Au/PVA-Fe ₃ O ₄ /n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda oda sıcaklığında bulunan elektriksel parametreler	73



1. GİRİŞ

Yarıiletken devre elemanları günümüzde elektronik aygıtlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Metal-yarıiletken (MS) kontaklar ise çağımızda bu alanda giderek etkinlik kazanmaktadır. Metal-yarıiletken kontaklar, bu konudaki ilk ayrıntılı çalışmaları yapan kişi olan Alman fizikçi Walter H. Schottky'e atfen Schottky bariyer/engel diyotları (SBD) olarak da isimlendirilmektedir.

MS kontaklar ile ilgili ilk araştırmalar yüz elli yıl kadar öncesine dayanmaktadır. Metal malzeme yarıiletken bir levhaya dokundurularak alınan kontaklarla ilk MS tipi yapılar elde edilmiş ve bunlardan dedektör olarak yararlanılmıştır. Tek noktaya değdirilerek elde edilen kontaklarla ilgili yapılan araştırmalar sonucu kontak parametrelerinin tutarlı sonuçlar vermediği gözlenmiştir. Metal malzemenin yarıiletken malzeme üzerine ince bir katman halinde kaplanmasıyla elde edilen MS kontakların, noktasal kontaklara göre çok daha başarılı olduğu görülmüştür.

Schottky 1900'lü yılların ilk yarısında M/S tipi SBD'lerin doğrultucu olarak kullanılabilmesi ile ilgili çalışmalar yaparken M/S arayüzeyinde oluşan bariyerin sebebinin yarıiletken kısmındaki kararlı yükler olacağını savunmuştur. Daha sonraki yıllarda arayüzeyde oluşan bu bariyerin yapısıyla ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bariyerin boyutunun bulunması, tipi ve hangi koşullarda oluştuğunun açıklanması konuları araştırılmıştır. SBD yapılarıdaki akım iletim mekanizmaları için çeşitli teoriler geliştirilmiştir. Nobel ödüllü alman fizikçi Hanz Bethe bu modellerden biri olan termioyonik emisyon teorisini (TE) bulmuştur. Bu teoriye göre akım, elektronların yarıiletkenden metale emisyon (yayınım) yapmasıyla ilerler.

Sonraki yıllarda M/S yapılarında arayüzeyde yalıtkan ya da polimer malzemeler büyütülerek metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve (MPS) tipi diyotlar da araştırılmıştır. Bu şekilde oluşturulan diyotların çalışma performansını etkileyen pek çok faktör vardır. Diyotun hangi gerilimde, frekansta, sıcaklıkta kullanıldığı, M/S arayüzeyinde büyütülen katmanın saflığı, kalınlığı, diyotun seri direnci (R_s) bu etmenlerden bazılarıdır. Ayrıca

diyotun yarıiletken kısmında oluşan alıcı, verici atomlar ve yasak enerji bandında varolan arayüzey durumları (N_{ss}) da yine bu faktörlerdendir.

Evcin Baydilli vd. (2020) metal malzeme ile yarıiletken malzeme arasına katılacak malzemenin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü bu ara tabaka aygıtın performansını iyileştirebilir. M/S arayüzeyine yalıtkan tabaka olarak dielektrik özellik gösteren malzemeler kaplanabilmektedir. Bu malzemeler hem yalıtandırılar hem de elektriksel kutuplanma özelliği gösterirler. Dielektrikler elektrik alan altında akım oluşturmaz fakat yükler az da olsa hareket ederek polarize olur. Bu özellikleri ile metal ve yarıiletken kısmı birbirinden ayırırken aradaki yük alışverişini de kontrol ederler. Bu sebeplerle son zamanlarda yapılan çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedirler. MIS-MPS yapılar bir kapasitör gibi düşünülürse aradaki dielektrik malzemenin dielektrik sabiti ne kadar büyükse oluşturulan yapının verimi o ölçüde iyileşebilir. Dielektrik sabiti (ϵ) dielektrik malzemenin yükü üstünde depolayabilme özelliğini ifade eden bir katsayıdır. ϵ 'nin büyük olması R_s değeri ile n 'nin küçülmesine neden olarak arayüzey durumlarını da azaltır. Ancak bu sırada kısa devre direnci (R_{sh}) değerini de büyütebilir (Baraz vd. 2018, Badali vd. 2019).

Aygıtın verimliliğini etkileyen bir diğer parametre bileşenlerin iş fonksiyonlarıdır (metal için Φ_m ve yarıiletken için Φ_s dir). Bu değerler metal ve yarıiletkende bir elektronu Fermi seviyesinden (E_F) serbest hale getirmek için gereken enerjidir. Eğer metal ile p- tipi yarıiletken kontak ediliyorsa, $\Phi_s > \Phi_m$ olduğunda doğrultucu kontak, $\Phi_m > \Phi_s$ ise de omik kontak adı verilir. M/S arasında omik kontakta potansiyel engel yoktur. Engel olmadığı için de akım her iki yönde de akar (Sharma 1984, Rhoderick ve Williams 1988, Sze vd. 2007)

Akım-voltaj(I-V), kapasite-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω -V) ölçümleri alınırken gerilimi, frekansı, sıcaklığı değişken kılmak MS, MIS – MPS tipi SBD'lerde mekanizmaların ve dielektrik parametrelerin ayrıntılı biçimde açıklanması için gereklidir. Ayrıca bu şekilde ölçüm alarak metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşan engelin yüksekliği ve yapısıyla da ilgili daha doğru bilgilere ulaşabiliriz (Werner ve Güttler 1991, Zeyrek vd. 2006). Bilhassa sıcaklığın ve frekansın daha düşük olduğu

durumlarda MS, MIS, MPS yapıların akım iletim mekanizmaları (CCMs) ve dielektrik özelliklerine açıklık getirme konusunda literatürde çalışma sayısı daha sınırlıdır (Padovani ve Sumner 1965, Kaya vd. 2014). Eğer yarıiletkenin katkılanma oranı büyükse ve nispeten daha düşük sıcaklıklarda çalışılıyorsa termoiyonik emisyon teorisinden sapmalar olur. Termoiyonik alan emisyonu (TFE) adı verilen kuantum mekaniksel tünellenme ve alan emisyonu dediğimiz (FE) teorileri geçerli olur (Padovani 1966, Özdemir vd. 2006, Alialy 2015).

Boughdachi vd. 2018 yılında Evcin Baydilli vd. 2020 yılında yaptıkları çalışmalarda sıcaklığa bağlı olarak yapılan düz beslem I-V ölçüm sonuçlarından bulunan parametrelerden biri olan M/S arayüzeyinde oluşan bariyerin yüksekliği sıcaklıkla doğru orantılı bir artış sergilemekte, sıcaklık arttıkça idealite faktörü ise azalan bir değişim göstermekte ve ideal durum olarak kabul edilen 1'den büyük çıkmakta olduğunu belirlemişlerdir. Bariyer yüksekliğinin (Φ_B) ve idealite faktörünün (n) bu şekilde birbirleriyle ters orantılı davranışı M/S arayüzeyindeki bariyerin küçüklü-büyüktepeciklerden oluştuğunun ve heterojen bir yapıda olduğunun göstergesidir. Ortamın sıcaklığı, sisteme uygulanan voltaj ve tepeciklerin yüksekliklerine göre engeli aşan taşıyıcıların sayısı değişir. Bariyerin homojen olmaması Gaussian Dağılım (GD) olarak ifade edilir (Büyükbaş Uluşan vd. 2017, Evcin Baydilli vd. 2020). $\Phi_B - 2kT$ klasik Richardson grafiklerinde birden fazla eğime sahip bölge oluşabilir. Bunlara da Double Gaussian Dağılım (DGD) adı verilir (Schmitsdrof 1997, Werner ve Güttler 1991, Sattar ve Rahman 2003, Kaya vd. 2016). Bariyerin heterojen olduğu durumda sıcaklık değeri düşük olduğunda engeli aşacak kadar enerjisi olmayan taşıyıcılar dahi büyük engelin civarındaki bu küçük engelicikleri aşmayı başararak sistemden daha fazla akım geçmesini sağlayacaklardır. Bu da n değerinin büyüyerek idealden uzaklaşmasına sebep olacaktır ($n \neq 1$). Yüksek sıcaklık değerlerinde durum daha farklıdır. Burada TE teorisi geçerli olacak yani elektronlar yeterince enerjiye sahip olacakları için bariyerin üstünden rahatça atlayabileceklerdir.

M/S arayüzey tabakası olarak dielektrik sabitinin büyük olması sebebiyle son yıllarda polimer malzemeler katkısız veya metal malzeme ile katkılanmış olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Karataş ve Altındal 2005, Vural vd. 2010, Yahia vd. 2011, Özavcı vd.

2013, Tecimer vd. 2013). M/S arayüzeyindeki bariyer yüksekliği, arayüzeye metal katkılı/katkısız polimer büyütme işlemiyle gözetim altında tutulabilir ve bu şekilde aygıtın verimliliği de iyileştirilebilir. Polimerlerin, kimyasal dayanıklılıkları, ucuz olmaları, üretimlerinin kolay olması tercih edilme sebeplerinden bazılarıdır. Polivinil alkol (PVA) ise hidrofolik yani suda hızlı çözünebilen, yarı kristal ve yapısındaki hidroksil (OH) grupları sayesinde basitçe H-bağı yapabilen, yalıtkan bir malzemedir. PVA'ya bakır, çinko, kalay gibi bazı metal malzemeler eklenerek MPS yapılar oluşturmada M/S arayüzeylerinde kullanılabilir. M/S arayüzeyinde büyütülen katmanın kalınlığı da oldukça önemlidir. Eğer katman çok kalınsa diyot kondansatör gibi davranır. Polimer ya da yalıtkan bu arayüzey tabakasına metal karıştırmak katmanı biraz daha iletken hale getirir. Baraz vd. 2016 ve 2017 yıllarında yaptıkları çalışmalarda hazırladıkları ZnS'li çözeltilere PVA ekleyip arayüzey durumlarının etkinliğini azaltıp MPS tipi yapıdaki elektriksel ve dielektriksel değişimleri incelemişlerdir. Bunun gibi istenmeyen arayüzey durumunun PVA eklenmesiyle azaltıldığını gösteren pek çok çalışma vardır (Sharma ve Tripathi 2016, Ozga vd. 2016).

M/S arayüzeyine kaplanan malzemenin türüne göre MIS, MPS gibi isim alan SBD yapılarda, arayüzeydeki katman gereken kalınlıkta büyütülürse metal ve yarıiletkeni birbirinden yalıtır. Bu yalıtım ne kadar iyiye metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale yük aktarımı o kadar az olur (Vafayi ve Gharibe 2013). Devrede kondansatör gibi çalışan bu yapılar elektriği bünyelerinde biriktirirler. Kondansatörler, plakaları arasında elektrik enerjisini depolayabilir ve kısa devre olması durumunda da bu enerjiyi hızlıca boşaltabilirler. Kondansatörün plakaları arasındaki mesafe, aradaki dielektrik malzemenin türü ve iletken tabakaların yüzey alanı, aygıtın yük depolama sığasını belirler. Arayüzeyde büyütülen malzemenin dielektrik sabiti büyük ve yeterince ince olursa bunlar kondansatörün performansını artırır. Ayrıca kondansatörler devrede alternatif akımı (AC) geçirirken doğru akımı (DC) geçirmezler. M/S arayüzündeki dielektrik malzemede depolanan yüklerin ömrü (τ) bir tam dalga oluşması için geçen süreden küçükse yükler alternatif akımı izleyerek kapasiteyi arttırabilirler. Bu sebeple kondansatörlerin performansını arttırmak için yüklerin uzun ömürlü olması istenir. Kondansatörler bilgisayardaki rastgele erişilebilir bellekler (RAM), hoparlörler, cep telefonları, dijital saatler gibi pek çok teknolojik uygulamalarda kullanılırlar.

Bu tez çalışmasında, Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si ve Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların sıcaklığa bağlı Akım- gerilim ölçümleri yapılarak diyot parametreleri ve akım iletim mekanizmaları incelenmiş ve çift Gaussian dağılım ile izah edilebileceği anlaşılmıştır. Aynı zamanda Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi yapısının, 0.1 kHz – 1 MHz frekans arasında, kapasite-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) ölçümleri (-5V) – (+7 V) voltajda oda sıcaklığında yapılmıştır. Bu diyota ait dielektriksel özellikler incelenmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

Yüksek vakum altında yarı iletken ve metallerin kontak edilmesi durumunda oluşan metal - yarıiletken kontaklar ya da diğer ismiyle Schottky bariyer diyotlar (SBDs) hakkında pek çok teorik ve deneysel çalışma yapılmakta fakat metal ve yarı iletken arasındaki bariyerin oluşumu ve akım-iletim mekanizmaları halen tam anlamıyla aydınlatılamamıştır.

Metal-yarıiletken kontaklarda doğrultma özelliği konusundaki ilk çalışma 1870 de Braun ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. 1932’de Wilson ve arkadaşları yaptıkları çalışmada metal ve yarıiletken arasında oluşan potansiyel bariyerinden elektronların kuantum mekaniksel tünellemeyle geçtiklerini belirtmişlerdir (Sharma 1984, Sze vd. 2007).

Mott ve Schottky potansiyel bariyerinden elektronların difüzyon yoluyla geçtiklerini ve böylece doğrultma özelliği oluşturduğunu bildirmişlerdir (Mott 1938). Bu bariyerin oluşma sebebi birbirine kontak edilen iki malzemenin iş fonsiyonlarının birbirinden farklı olmasıdır. Arayüzey bölgesinde Mott’a göre safsızlık atomları yok iken Schottky’e göre bu bölgede değişmeyen safsızlık atomları mevcuttur.

Diyotun doğrultma oranı (RR) performansını belirleyen önemli bir parametresidir. Diyotun aynı doğru ve ters ön gerilimler altındaki akımların oranı doğrultma oranı ($RR = I_F/I_R$) olarak tanımlanmaktadır. İdeal bir Schottky diyotta (SD) yeterince ileri/doğru ve ters gerilimlerdeki akım oranları $\geq 10^{10}$ civarındadır (Sze vd. 2007).

Metal malzemeye yarıiletken malzeme kontak edilirken yüzeyler arasındaki direncin çok küçük olması tercih edilir ve bu birleşme atomik ölçekte olur. Kontak yapılacak malzemeler olabildiğince temiz olmalıdır. Bir yarıiletken ve metal kontak edilirse iki malzeme arasında yük geçişleri olur. İki malzeme atomları arasındaki bu geçiş

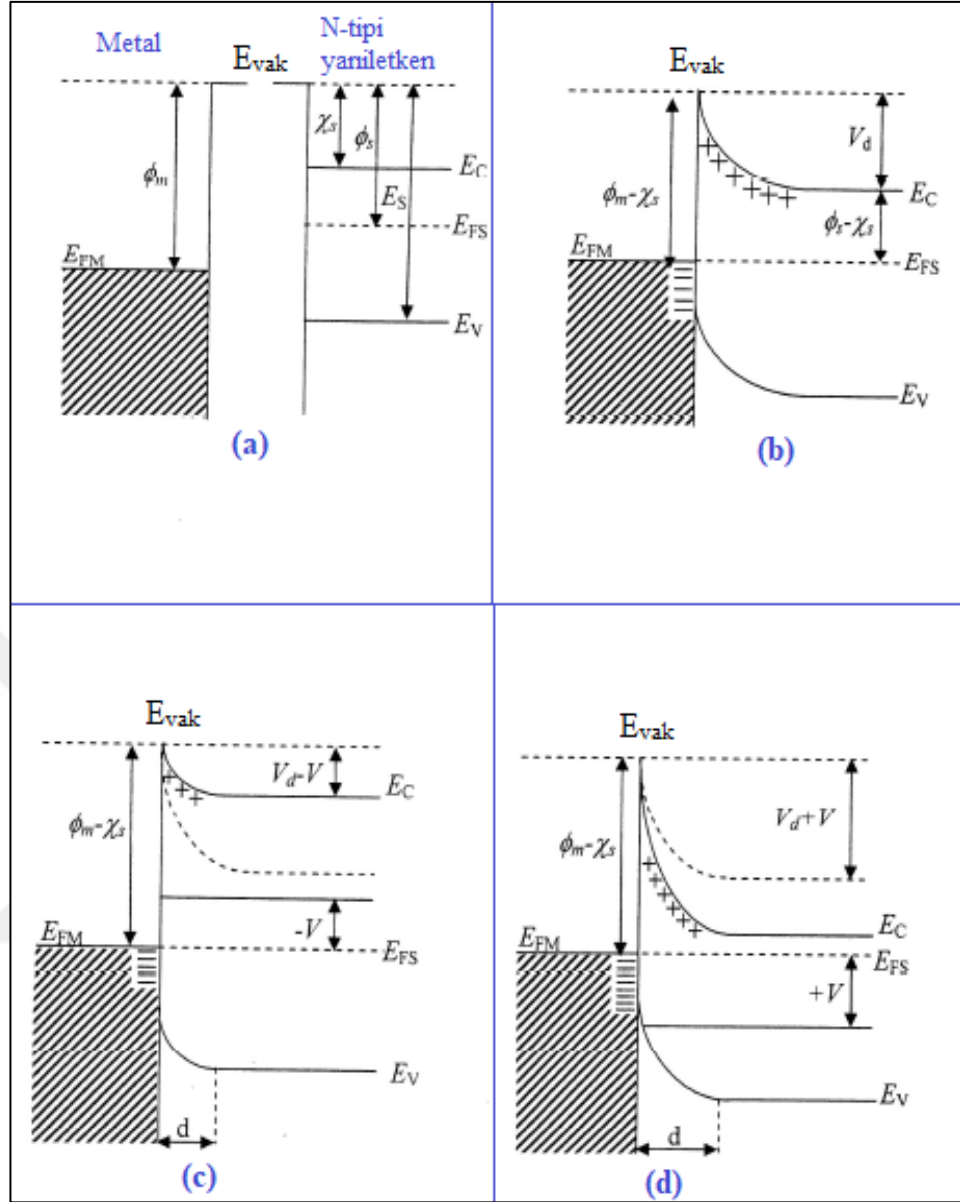
yarıiletken tabaka ile metal tabakanın Fermi enerji seviyeleri (E_F) denkleinceye kadar devam eder.

Doğrultucu kontaklarda akım taşıyıcıları olan elektron veya deşiklerin bir yönden diğerine göre daha kolay geçmesine sebep olan bir bariyer mevcuttur. Omik kontaklarda potansiyel bariyer olmadığı için her iki malzeme arasında taşıyıcılar rahatça hareket etmektedir. Ara yüzey tabakalı ya da tabakasız MS yapılar oluşturulurken, M/S arayüzeyinde bir potansiyel bariyer varolabilmesi için Φ_s ile uyumlu Φ_m 'ye sahip metal ve yarıiletkenler tercih edilmelidir. Bunlar sıklıkla alüminyum (Al) altın (Au), gümüş (Ag) vb. metaller ile doğada bolca bulunan ve yüksek sıcaklıklarda kararlı olan silisyum (Si) yarıiletkenidir.

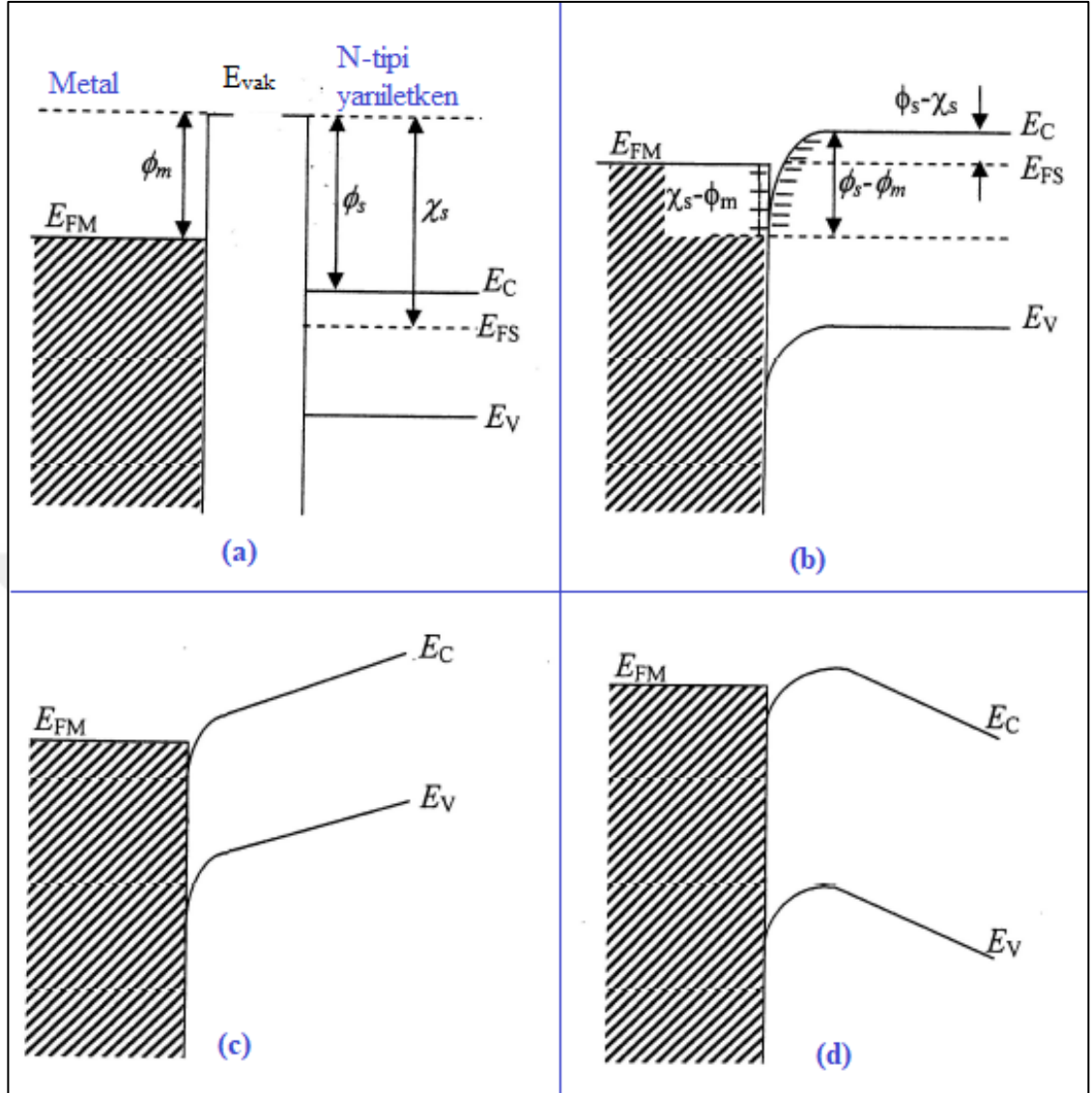
2.2 n-Tipi MS Kontaklar

Metal bir malzeme ve yarıiletken bir malzeme (n-tipi) kontak edildiğinde enerjisi metalin elektronlarından çok olan yarıiletken elektronları metale doğru giderler. Metalde ise düşük enerji seviyelerine yerleşirler. Böylece kontak civarındaki yarıiletken serbest elektron yoğunluğu azalır ve E_{FS} yasak enerji bandının orta kısmına ilerler, E_{FM} elektron yoğunluğu fazla olduğundan görece sabittir. Termal dengeye gelindiğinde yük alışverişi sonlanır. Yarıiletkene ait valans bandı ve iletkenlik bantları üst yönde ($\Phi_m - \Phi_s$) ölçüsünde kıvrılır (Şekil 2.1). Metal kısma yarıiletkenden gelen elektronlar geride artı yükler oluşmasına sebep olurlar. Bu elektronlar metal kısımda eksi yük alanını kontak yakınında oluştururlar. Yüklerin kontakta bu şekilde yer değiştirmelerinden ötürü M/S kontakta Φ_{B0} oluşur. Ayrıca da kontakta yarıiletken kısımdan metal kısım yönünde elektrik alan ortaya çıkar (Sze 1981, Rhoderick ve Williams 1988).

N-tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarına göre $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda, akım taşıyıcıları bir yönde diğerine göre daha kolay hareket ederek metal/n-tipi doğrultucu kontağı oluştururlar.



Şekil 2.1 M/S (n-tipi) doğrultucu (Schottky) yapının enerji-bant diyagramı: a) Kontak alınmadan önce b) Kontak alındıktan sonra c) Negaif gerilimde d) Pozitif gerilimde.

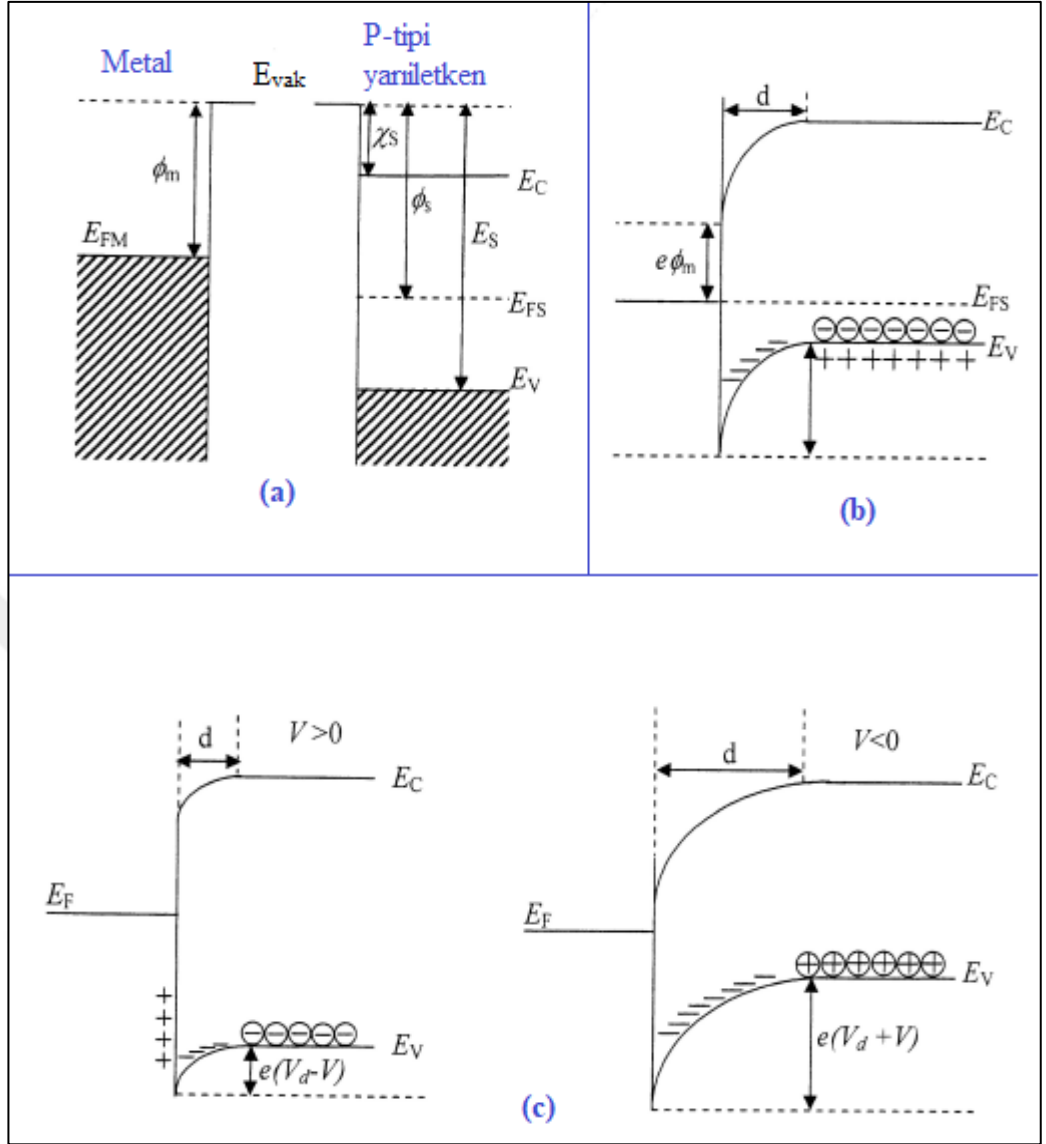


Şekil 2.2 M/S (n-tipi) omik (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı a) Kontak yapılmadan önce b) Kontak yapıldıktan sonra, c) Negaif gerilimde d) Pozitif gerilimde.

M/S (n-tipi) omik kontak $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda ortaya çıkar. E_{FS} M/S kontak alınmadan, E_{FM} 'den $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar aşağıdadır (Şekil 2.2). N-tipi yarıiletken ve metal kontak yapınca yükler metalde artı yük oluşturarak metal kısımdan yarıiletken kısıma doğru akarlar. Neticede yük alışverişi sonrası çiftkutup katmanı oluştururlar. Yük alışverişi sonlanınca ise, $(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar yükselirler.

2.3 p-Tipi MS Kontaklar

Akım iletimi deşikler tarafından sağlanan p-tipi yarıiletken ile bir metalin kontak edilmesi durumunda yarıiletkenin iş fonsiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük olursa enerji band diyagramları verilmiştir (şekil 2.3) (Sedef 2002). Yarıiletkenin yüzeyinde kontak alınmadan herhangi bir yük yoktur ve bandlar düzdür. P-tipi yarıiletken, metal ile kontak yapıldığında metaldeki yüksek enerjili elektronlar yarıiletken yönünde ilerlerler. Metale ait negatif yükler yarıiletkene doğru hareket ederek boş olan enerji seviyelerine geçerler. Bu durum yarıiletkenin boş enerji seviyeleri kontağın metal kısmına ilerliyorlarmışcasına görünmesine neden olur. Yük geçişi Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. Bu geçişlerin sonucunda bir potansiyel bariyeri ile metalden yarıiletkene doğru bir elektrik alanı ortaya çıkar. Böyle bir eklem doğrultucu kontak özelliğini sergilemektedir (Yahia vd. 2011).



Şekil 2.3 (a) M/S (p-tipi) doğrultucu yapının enerji-bant gösterimi (a) Kontak alınmadan önce (b) Kontak alındıktan sonra (c) $V \neq 0$ iken.

Kontak alınmadan önce yarıiletkenlerin yüzeylerinde herhangi bir yük yoktur. Şekil 2.3'de bir M/S (p-tipi) kontağının, enerji band gösterimi çizilmiştir. M/S (p-tipi) kontaklarda metaldeki yüksek enerjili negatif yükler yarıiletkene giderler. Metal kısımdaki negatif yükler yarıiletkene doğru gidip buradaki dolu olmayan yerlere geçince sanki yarıiletken tabakadaki dolu olmayan yerler metal tabakaya ilerliyorlarmış görüntüsü oluştururlar. Bu şekilde oluşan yapının doğrultma özelliği vardır (Şekil 2.3.b). Bu şekilde oluşan kontak Schottky kontağı olarak isimlendirilir (Yahia vd. 2011). Banddaki bükülmenin değeri;

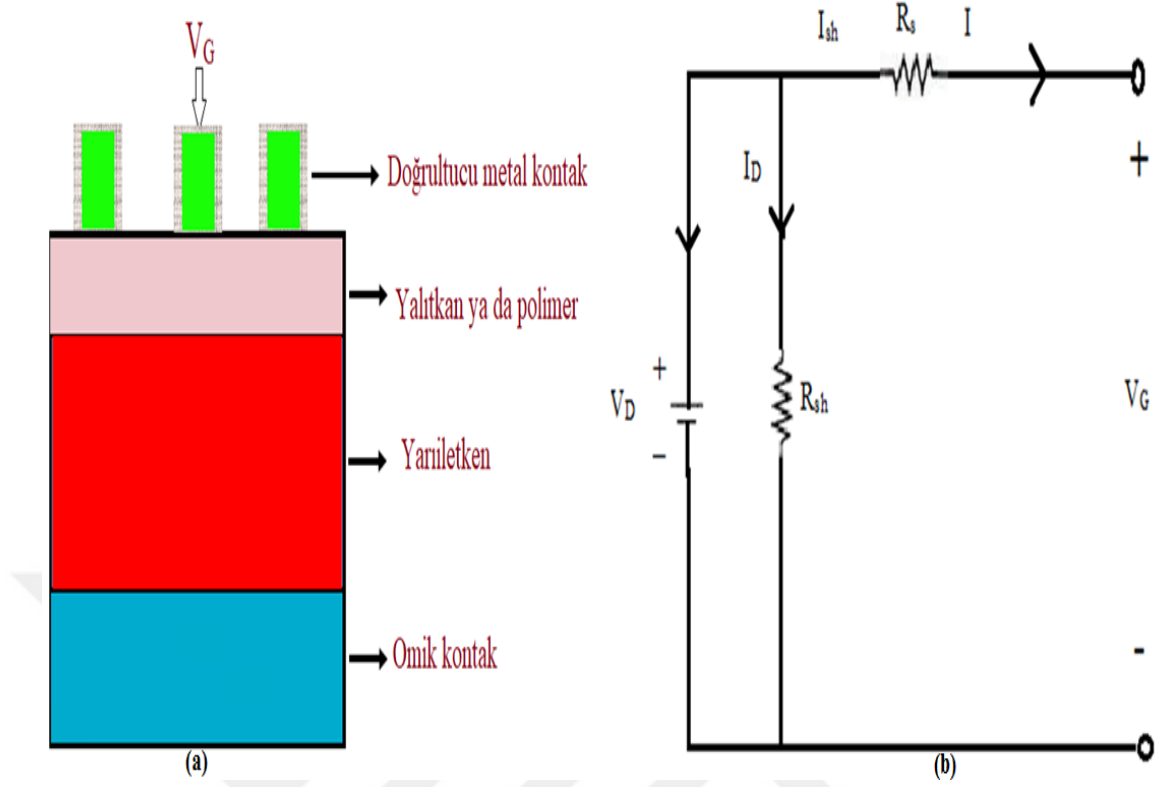
$$qV_d = \Phi_s - \Phi_m$$

(2.1) biçiminde olur. Denklemden V_d kontak potansiyeldir.

Metal- yarıiletken kontağa metal kısım eksi yarıiletken kısım artı olacak şekilde gerilim uygulanırsa düz beslem, kutuplar tersi şekilde olursa da ters beslem adını alır (Şekil 2.3b).

2.4 Metal-Yarıiletken ve Metal-Polimer-Yarıiletken Yapılarda Arayüzey Durumları

Metal-Yarıiletken ve Metal-Polimer-Yarıiletken yapıların eşdeğer devresi Şekil 2.4 de gösterilmiştir. Burada, R_s ve R_{sh} sırasıyla seri ve kısa devre direncidir. R_s ve R_{sh} yapıların verimliliğini etkileyen önemli parametrelerdir. R_s nin çok küçük ve R_{sh} nin de çok büyük olması istenir. Seri direncin yeterince küçük olması durumunda neredeyse bütün gerilim diyot üzerindedir. Kısa devre direnci de eğer çok büyükse üzerinden hiç akım geçemez ve akımın tamamı yine diyottan geçer. R_s ile R_{sh} istenilen değerlerde olursa diyotun performansı ideal olur. Seri direnç oluşumunun pek çok sebebi vardır. Bunlardan bazıları, arayüzey tabakasının varlığı, kontak kısımlarındaki kirlilikler, kontak alma işlemi sırasında oluşabilen safsızlıklardır. R_{sh} ise çoğunlukla kontak bölgesindeki yapı kusurlarından kaynaklanır.



Şekil 2.4 MS ile MIS yapının a) Şematik çizimi b) eşdeğer devresi seri direnç (R_s) ve paralel direnç (R_{sh})

Metal-yalıtkan veya metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken kontaklar üretilirken yarıiletken malzemenin yüzeyi her ne kadar dikkatlice safsızlıklardan arındırılmaya çalışılsa da yine de ortamdaki kirliliklerden ötürü pek çok arayüzey durumu (N_{ss}) oluşur. İstemsizce oluşan arayüzey durumları yarıiletkende yasak enerji bant aralığında (E_g) çeşitli seviyelerde yerleşirler. E_g 'de yeni seviyeler oluşturarak yerleşen arayüzey durumlarının bulundukları yere göre isimlendirilirler (Çizelge 2.1)

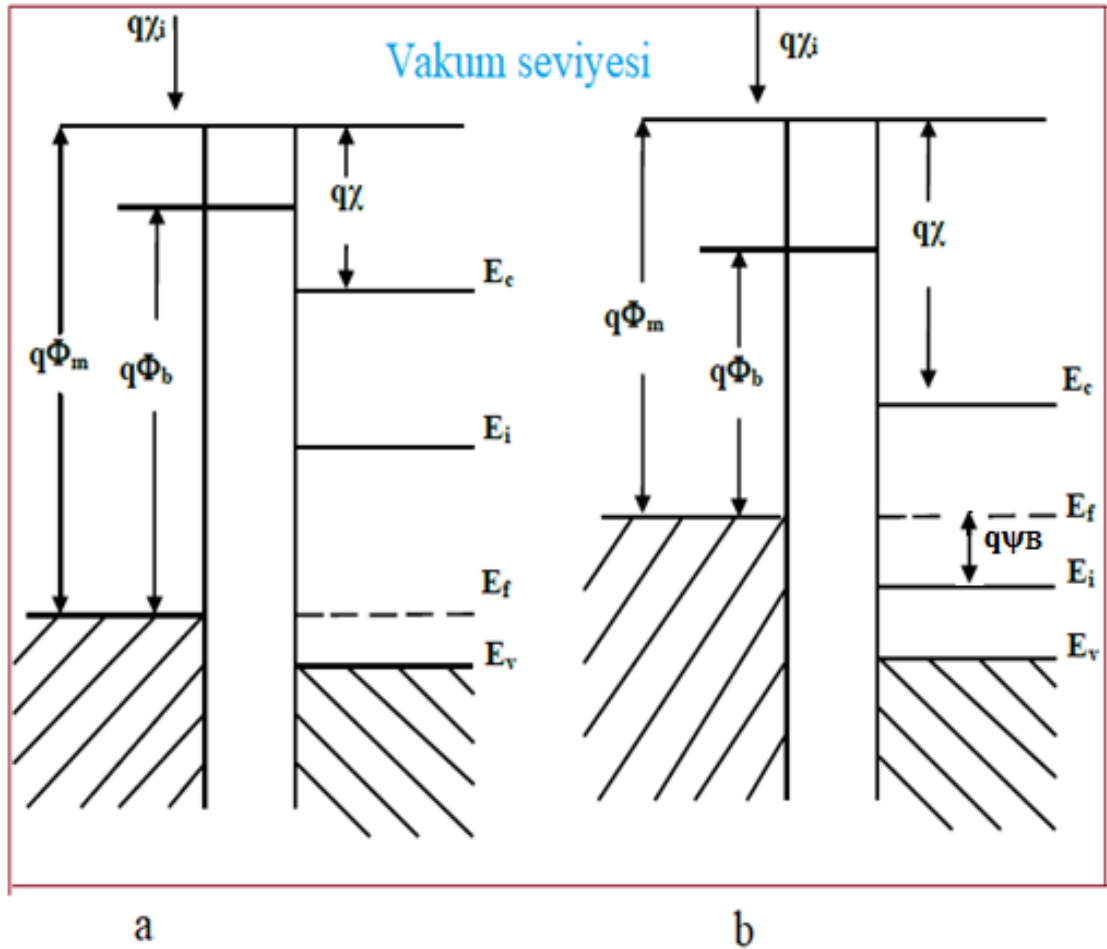
Çizelge 2.1 yarıiletken tipine bağlı olarak arayüzey durumlarının oluşturduğu tuzaklar

Tuzak Tipi	p-tipi	n-tipi
Sığ	Valans bandı (E_v) yakınlarındaysa (verici safsızlık)	İletim bandı (E_c) yakınlarındaysa (alıcı safsızlık)
Derin	Daha derinlerde ise	Daha derinlerde ise

MIS-MPS bir yapıya ait şematik gösterim de yine şekil 2.4’de verilmiştir. MIS ya da MPS yapılarda yarıiletken malzeme ile metal malzeme arasına katılan polimer veya yalıtkan tabaka M/S arasındaki yük geçişlerine etki eder.

2.5 İdeal Metal-Yalıtkan/Polimer-Yarıiletken Kontaklar

Metal-yalıtkan/polimer ve yalıtkan/polimer-yarıiletken yapıların ideal durumda sıfır beslemdeki band diyagramı Şekil 2.5’de gösterilmektedir. İdeal durum, Φ_m ve Φ_s nin birbirine eşit ve arayüzey yüklerinin olmadığı durumdur. Yapıya gerilim uygulanınca aradaki polimer ya da yalıtkan tabakadan dolayı akım geçmemelidir. Ancak pratikte bir miktar elektriksel iletkenlik olabilir (Card ve Rhoderick 1971, Fonash 1975).



Şekil 2.5 İdeal durumda MIS/MPS yapıda a) p- tipi yarıiletken b) n- tipi yarıiletken

Şekil 2.5’de $q\psi_B$ E_F ile E_i arasındaki enerji farkı, χ ise yarıiletkenine ait elektron yatkınlığıdır. Bu yapılarda metal kısma gerilim uygulanırsa (V_G) yarıiletken kısımdaki elektronlar da metal kısımdakiler kadar olmasa da hareketlenir. Çünkü metal kısımda serbest yükler yarıiletkendekine göre daha çoktur. V_G ’nin bir bölümü yarıiletken üzerine bir bölümü de yalıtkan kısım üzerinde düşer.

$$V_G = V_{ox} + \Psi_s \quad (2.2)$$

Bu denklemde V_{ox} yalıtıkanda düşen potansiyeli, Ψ_s ise arayüzeydeki potansiyeldir (Neamen 1997).

2.6 Metal – Yalıtkan / Polimer - Yarıiletken Yapıların Akım – Gerilim – Sıcaklık Belirtgenleri

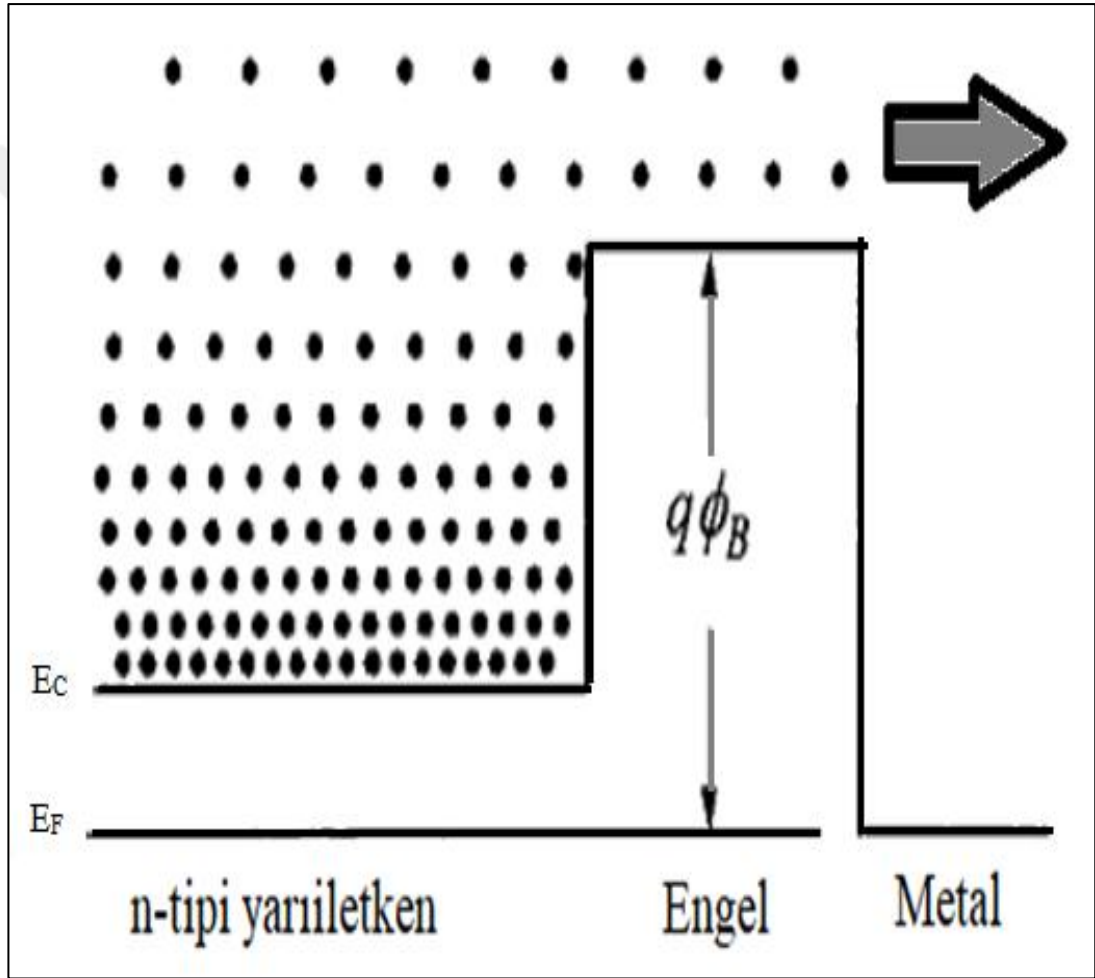
Metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken SBD lerde metal ve yarıiletken arasında oluşan bariyerin durumu sıcaklığa göre incelenirken akım-voltaj (I-V) kapasite-voltaj (C-V) ölçüm sonuçlarından yararlanılabilir. Bariyerin yüksekliği ve şekli elektriksel iletimde çok önemlidir. Akım iletim işleyişinin ayrıntılı ve doğru biçimde tespiti ve bariyer yüksekliğinin hesaplanması için I-V ve C-V ölçümleri farklı sıcaklık ve frekanslarda gerçekleştirilmelidir. Bunun sebebi ne kadar geniş aralıklarda ve fazla sayıda veri elde edilirse sonuçlar da o kadar güvenilir ve kapsamlı olacaktır.

Başlıca akım-iletim mekanizmaları aşağıdaki gibidir;

- 1- Termoiyonik Emisyon (TE) Teorisi: Taşıyıcıların bariyer üzerinden geçecek kadar enerjilerinin olduğu durum.
- 2- Termoiyonik Alan Emisyonu (TFE) ve Alan Emisyonu (FE): Taşıyıcıların bariyerden tünellemesi.
- 3- Kontak kısmında taşıyıcıların bazı sebeplerle önce oluşması sonra da birleşmesi (GR)

Metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken diyotlardaki geçerli akım iletim mekanizmalarının tespitinde diyotun N_{ss} değeri, sıcaklığı, R_s ve R_{sh} , metal ve yarıiletken kısımların arasına katkılanan polimer ya da yalıtkan katmanın kalınlığı ve saflığı gibi etmenler önemlidir. Taşıyıcılar gereken enerjiye ulaştıkları zaman termoiyonik emisyon teorisine

göre bariyerin üstünden atlayarak metal ve yarıiletken arasında hareket edebilirler (şekil 2.6). Termoiyonik emisyon teorisi oda sıcaklığından başlayarak daha yüksek sıcaklıklarda ve görece düşük katkılama miktarına sahip yarıiletkenlerde geçerlidir. Bunun dışında katkılama miktarı yüksekse ve daha yüksek sıcaklıklar söz konusuysa bu teori geçerliliğini kaybeder. Termoiyonik emisyon teorisinin tam olarak geçerli olduğu durum $n = 1$ olduğu durumdur.

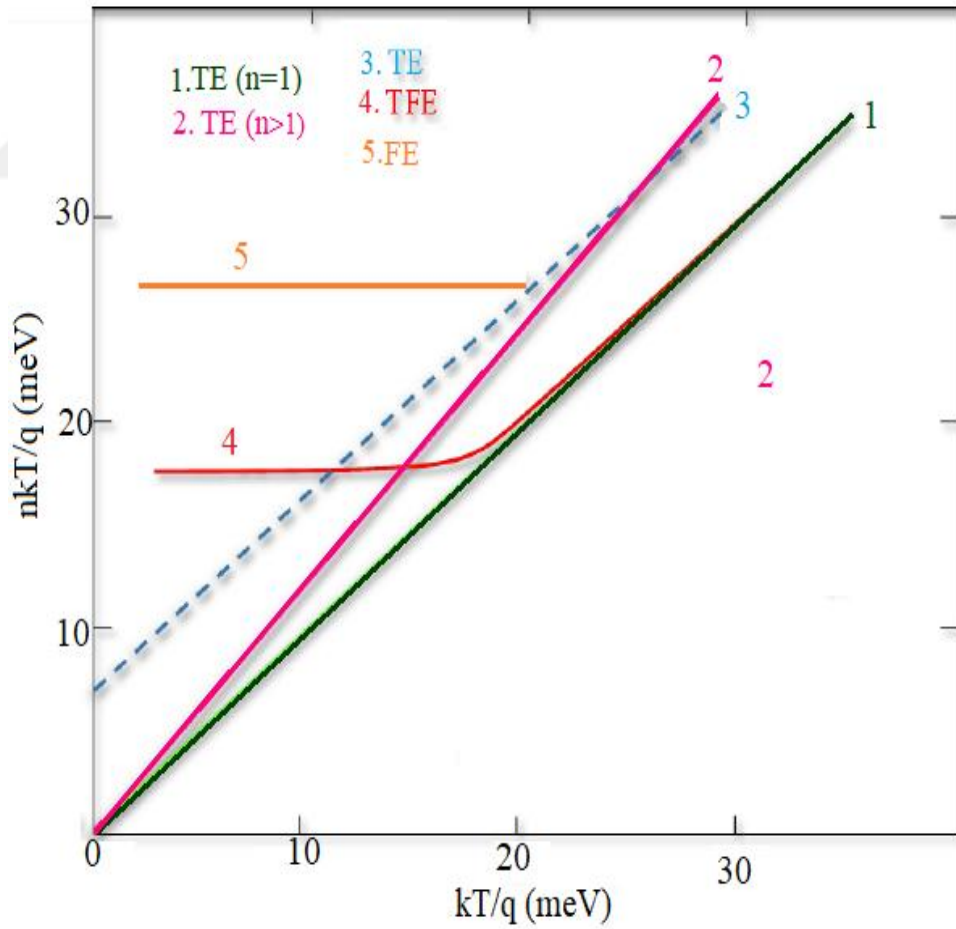


Şekil 2.6 TE teorisine göre taşıyıcıların bariyer üstünden geçişi.

Öteki mekanizmalar ise ideal olarak düşünülen durumun dışında gerçekleşirler. İdeal olmayan durumda seri direnç vardır ve $n > 1$ 'dir (Sharma 1984, Sze 2007).

Termoiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu dediğimiz teoriler tünelleme olayına dayanırlar. Alan emisyonunda düşük sıcaklıklarda ve yarıiletkenin katkı oranı yüksek iken taşıyıcılar bariyerin içinden tünelleme yaparak geçerler. Termoiyonik alan emisyonunda ise sıcaklık alan emisyonuna göre biraz daha yüksektir ve dolayısıyla taşıyıcılar sıcaklığın etkisiyle az miktarda da olsa enerji kazanmışlardır. Bu enerji yardımıyla yine bariyerden tünelleme yaparak geçerler. Tünellemede katkılama miktarı ve sıcaklık çok önemlidir. Ayrıca katkı miktarı ortalama seviyelerde olan bir yarıiletkende çok yüksek ya da çok düşük olmayan sıcaklıklarda taşıyıcıların difüzyon yapma ve bariyer bölgesinde oluşup sonra birleşmesi ihtimalleri de düşünülmelidir (Schottky 1938, Sharma 1984).

Akım-iletim mekanizmalarının belirlenmesi idealite faktörünün değeri ile ilişkilidir (şekil 2.8).



Şekil 2.7 Temel akım-iletim türlerinin idealite faktörüne göre değişimi

MS, MIS ve MPS tipi diyotlar veya güneş pillerinde idealite faktörü (n) iletim mekanizmaları ve performans üzerinde çok belirleyici bir faktördür. Bu yüzden, Şekil 2.7’de görüldüğü gibi birçok akım-iletim mekanizması (nkT/q) – kT/q grafiğinden kolayca görülebilir. Şekilde 1 ile gösterilen eğri ideal duruma aittir. 2. eğride ise ideallikten sapma vardır yani $n \neq 1$ dir. 3 numaralı eğride bir T_0 sıcaklığı vardır. 4 ve 5 numaralı eğriler de sırasıyla termoiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu teorilerinin geçerli olduğu durumlara aittir.

2.6.1 Termoiyonik Emisyon Teorisi

Eğer MS veya MPS tipi yapılarda yarıiletken tabakadaki taşıyıcıların yeteri kadar enerjisi varsa bariyerin üzerinden atlayarak geçebilir ki buna termoiyonik emisyon teorisi denir. Termoiyonik emisyon teorisi metal-yarıiletken yapılarda bariyer yüksekliğini (Φ_B) belirlemek için ilk olarak kullanılan teoridir. Eğer bu teoriden doğru sonuçlar alınmaz veya sapmalar gözlenirse başka yöntemler uygulanır. TE teorisine göre kT/q enerjisi Φ_B değerinden çok küçüktür. Ayrıca taşıyıcılar dediğimiz elektron veya deşiklerin ortalama serbest yolları tüketim alanının genişliğinden büyüktür. Termoiyonik emisyon teorisine göre bariyerden geçen taşıyıcıların akım-gerilim ilişkisi denklem 2.3a’daki gibidir (Sharma 1984, Sze ve Kwok 2007, Cowley ve Sze 1965). İdeal bir SBD yapıda TE teorisine göre $V \geq 3kT/q$ durumunda I-V ilişkisi denklem 2.4’deki gibidir:

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.3a)$$

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (2.3b)$$

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Burada I_0 doyma akımıdır ve eşitlik 2.3b ile gösterilir.

Eşitlik 2.3a, 2.3b ile 2.4'de, q elektronik yük ($=1,6 \times 10^{-19}$ C), V yapıya uygulanan voltaj, A^* Richardson sabiti, A diyotun alanıdır. IR_s seri direnç üzerinde düşen gerilim olup çok küçük olduğundan ihmal edilebilir, k Boltzmann sabiti ($=1,38 \times 10^{-23}$ J/K) dir. Denklem 2.3'de her iki tarafının $\ln$ 'i alınırsa denklem 2.5 haline gelir

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{q}{nkT} V \quad (2.5)$$

Denklem 2.4'de parantez içindeki qV/kT ifadesi qV/nkT şeklinde değiştirilerek teorik bir düzeltme yapılarak teorik ve deneysel uyum sağlanmış olur (Saxena 1969, Nicollian ve Brews 1982, Rhoderick ve Williams 1988).

Termoiyonik emisyon teorisine göre $V \geq 3kT/q$ olması durumunda denklem 2.5 $\ln I$ - V grafiğinin doğrusal olması gerektiğini belirtmektedir. Ancak bu grafik ileri voltaj değerlerinde R_s nin varlığından ötürü doğrusal davranışını değiştirir. $\ln I$ - V grafiğinin doğrusal kısmının $\ln I$ eksenine kesim noktasından I_0 doyma akımı ve eğiminin de idealite faktörü bulunur. Yapıların engel yüksekliği bu şekilde elde edilen I_0 değerlerinden denklem 2.4 yardımıyla bulunabilir. Hesaplamalarda Richardson sabitinin teorik değeri olarak p-tipi silisyum için $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve n-tipi silisyum için $112 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ alınmıştır. A^* ın deneysel değeri $\ln(I_0/T^2) - q/kT$ grafiklerinden hesaplanıp teorik değeriyle karşılaştırılabilir.

R_s 'nin değerini bulmak için Cheung fonksiyonlarını kullanabiliriz (Cheung ve Cheung 1986). Bu teoride R_s , I - V eğrisinin doğrusallıktan ayrıldığı bölgede etkilidir. Denklem 2.3 ün logaritması alınır ve yeniden düzenlenirse denklem 2.6 elde edilir.

$$V = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.6)$$

Bariyer yüksekliğini ve R_s 'yi bulmak amacıyla, denklem 2.6'deki biçimde bir $H(I)$ denklemi tanımlanabilir;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.7)$$

Bu denklemden yararlanılarak $H(I) - I$ grafiği çizilirse grafiğin eğimi R_s değerini verir. Bariyer yüksekliği ile idealite faktörünün deneysel sonuçlara göre hesaplanması sonucu

sıcaklığa göre aralarında negatif eğimli bir ilişki olduğu gözlemlenir. Bu ilişki teorik olarak beklenmedik bir sonuçtur. A^* 'ın değeri teorik değeriyle uyuşmadığı durumda ve n ile Φ_B 'ın arasındaki ilişki de ters orantılı olunca modifiye Richardson eğrisinden yararlanılarak da hesap yapılabilir. Bu eğriden hem A^* hem de Φ_B teorik değerlerine daha yakın olarak yeniden hesaplanır.

FE teorisine göre sıcaklığın küçük katkılama oranının ise büyük olduğu durumlarda tükenim gölgesi daralır ve bu bölgede taşıyıcılar bariyerin içinden tünelleme yaparak geçer. TFE teorisine göre ise sıcaklığın biraz daha yüksek olduğu durumlarda bir miktar enerji kazanan taşıyıcılar aynı şekilde bariyerin içinden geçerek tünelleme yaparlar. Termoyonik alan emisyonu denmesinin sebebi ise taşıyıcıların az da olsa termal enerji kazanmalarıyla bu tünellemeyi yapabilmeleridir.

Eğer yarıiletkenin katkılama oranı çok yüksekse bariyer çok küçülür ve böylece taşıyıcılar direkt olarak bariyerden tünelleme yapabilirler. Sıcaklık değişse de bu durumda $\ln I-V$ grafiğinde farklı sıcaklıklar için çizilen eğrilerin hepsinin eğimi aynı olur. Burada alan emisyonu teorisi geçerlidir diye düşünülür. Eğer böyle bir tünelleme varsa n değeri denklem (2.8)'de verilmiştir. Denklem (2.9)'da ise tünelleme parametresi (E_{00}) verilmiştir.

$$n_{\text{tun}} = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.8)$$

$$E_{00} = \frac{h}{4\pi} \left(\frac{N}{m_e^* \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

Denklemden, m_e^* etkin elektron kütlesi, h Planck sabiti, ϵ_s yarıiletkene ait dielektrik sabitidir. Termal enerji ile tünelleme parametresinin birbirlerine göre büyüklükleri kıyaslanarak muhtemel akım iletim mekanizması ile ilgili yorum yapılabilir. Örneğin tünelleme parametresi termal enerjiden çok küçükse TE teorisi daha çok geçerlidir. Tünelleme parametresi termal enerjiden çok büyükse FE teorisi daha çok geçerlidir. Eğer bu iki parametrenin değerleri birbirine yakınsa da ise TFE teorisi geçerlidir.

2.6.2 Gaussian Engel Dağılımı Modeli

Değişen sıcaklığa göre akım-gerilim ve değişen frekansa göre kapasite-gerilim ölçüm sonuçlarından hesaplanan Φ_{B0} aynı çıkmamaktadır. Bu iki hesaplama sonucunda çıkan bariyer yükseklikleri birbirinden Fermi Enerji seviyesi miktarında farklıdır. Bu değişimin sebebi I-V ölçümlerinin doğru beslem C-V ölçümlerinin ise ters beslem olarak yapılmasındandır. Akım-gerilim sonuçlarında bulunan bariyer yüksekliği değeri bilinenin aksine sıcaklık arttıkça küçülmektedir. Ayrıca yine akım gerilim ölçümlerinden yararlanılarak hesaplanan n değeri de ideallikten uzaklaşarak $n \gg 1$ bulunmuştur ve bu MS ve MIS SBD’lerde arayüzeyde oluşan bariyerin heterojen olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Gaussian Dağılım (GD) bariyerin homojen olmayışını izah edebilmektedir. Arayüzeydeki bariyer bu düşünceye göre tek değildir. Etrafında büyük küçük başka tepelikler de bulunmaktadır. Katkı atomlarının yarıiletkende gelişigüzel dağılması da bariyer potansiyelinin farklılaşmasına sebep olabilir. n ’in sıcaklık azaldıkça artması termiyonik emisyon teorisinin geçerliliğini kaybetmesine, bunun tünelleme ile de açıklanamayacağına ve Gaussian dağılımın işin içine girmesine işaret eder. $\ln(I_0/T^2) - q/kT$ eğrisinin lineerlikten uzaklaşması da yine termiyonik emisyon teorisinden bu aşamada sapma olduğunu kanıttır. Bariyerin heterojenliği açıklanırken Gaussian dağılım için düşük sıcaklıklarda heterojen bariyer yüksekliğinin bir standart sapması olan (σ_s) ortalama Φ_B ve çevresinde tepelikler (daha ufak bariyerler) olduğu varsayılmıştır. Buna göre;

$$P(\Phi_B) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\Phi_B - \bar{\Phi}_B)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (2.10)$$

$$\Phi_{ap}(T) = \bar{\Phi}_{B0} - \frac{q\sigma_{s0}^2}{2kT} \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{n_{ap}(T)} - 1 = -\rho_1(T) = -\rho_2 + \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (2.12)$$

$$\ln \left(\frac{I_0}{T^2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_s}{kT} \right)^2 = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{B0}}{kT} \quad (2.13)$$

Denklem (2.10)’da $\bar{\Phi}_B$ ortalama bariyer yükseklikli bir potansiyel bariyerine ait fonksiyondur. Denklem (2.11) ve (2.12) de ise Φ_{ap} ile gösterilen ifade görünen bariyer

yüksekliği, n_{ap} ile ifade edilen ise görünen idealite faktörüdür. Denklem (2.13) ise bilinen Richardson denkleminin türetilmiş hali olduğundan modifiye Richardson denklemi olarak adlandırılır.

MIS ve MPS tipi Schottky diyotların üretimi sırasında kusurlar oluşmaktadır. Bu kusurlar yüzey durumları veya arayüzey tuzakları olarak adlandırılır ve M/S arayüzünde yarıiletkenin yasak bant aralığındaki enerjilerde yerleşmişlerdir. Bu kusurlar Schottky bariyer diyotların verimini değiştirir. Uygulamada, ideallik faktörünün değeri, M/S arayüzünde bir ara tabakanın mevcudiyeti, onun kalınlığı (d_i) ve dielektrik sabiti (ϵ_i), tüketim bölgesinin kalınlığı (W_D) veya katkı atomlarının seviyesi ve ayrıca bariyer homojensizlikleri nedeniyle ideal durumdan ($n=1$) sapmıştır. Arayüzey tabakasının ve kusurların varlığındaki $n(V)$ ve efektif engel yüksekliği ($\Phi_e(V)$) denklem 2.15 de ve 2.16'da verilmiştir. Bu $n(V)$ ve $\Phi_e(V)$ denklemleri dikkate alınarak arayüzey durumlarının enerji bağımlılığı çıkarılmış ve denklem 2.14'de verilmiştir (Arbatti vd. 2007). Schottky bariyer diyotun verimliliğini arttırmak için MS arayüzeyine kaplanacak olan tabakanın dielektrik sabiti büyük ve yeteri kadar ince olmalıdır. Aksi halde SBD'nin verimliliği azalır.

$$n(V) = \frac{qV_i}{kT \ln(I_i/I_0)} = 1 + \frac{d_i}{\epsilon_i} \left(\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss} \right) \quad (2.14)$$

Denklem (2.15) de W_D tüketim bölgesinin kalınlığı ϵ_i polimer ya da yalıtıkana ait ϵ_s de yarıiletkenine ait dielektrik sabitidir.

$$\Phi_e(V) = \left[\Phi_{Bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) \right] V \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.16a)'da E_c iletkenlik band enerjisi, E_{ss} iletkenlik bandının altından itibaren arayüzey durumlarının enerjisi olmak üzere yüzey durumları enerjisi n- tipi yarıiletken için verilmiştir;

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (2.16a)$$

E_{ss} eşitlik (2.16b)'de gösterilmiştir (p-tipi yarıiletken);

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (2.16b)$$

2.7 Yapıların Kapasite – Gerilim (C-V) Karakteristikleri

Arayüzey tabakasının kalınlığı d_i olan yapının kapasitesi aşağıdaki denklemle verilir;

$$C_i = \frac{\epsilon_i A}{d_i} \quad (2.17)$$

Burada A etkin diyot alanı, ϵ_i arayüzey tabakasının dielektrik sabitidir. Bazı diyot parametrelerini bulmak için diyonun C-V ölçümleri kullanılarak sabit frekansta $1/C^2$ -V grafikleri çizilir. Eğrilerin lineer kısımların ekstrapolasyonundan V_0 kesim potansiyeli ve eğimlerinden N_D değerleri bulunur.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_0 + V)}{\epsilon_s q A^2 N_D} \quad (2.18)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir (Silikon için $11.8\epsilon_0$ olarak alınmıştır). Arayüzey durumlarının yokluğunda kesim potansiyeli difüzyon potansiyeli arasındaki ilişki denklem 2.19'da verilmiştir.

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.19)$$

Arayüzey durumlarının varlığında $1/C^2$ - V grafiğinin eğimi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_D} \frac{1}{(1+\alpha)} \quad (2.20)$$

Burada α nın ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\alpha = \frac{q N_{ss} d_i}{\epsilon_i} \quad (2.21)$$

$\left(\frac{1}{1+\alpha}\right)$, c_2 şeklinde bir sabitle tanımlanır ve

$$c_2 = \frac{2}{q\epsilon_s N_D (d(1/C^2)/dV)} = \frac{N_D}{N_D^*} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + q N_{ss} d_i} \quad (2.22)$$

İfadesiyle verilir. Burada N_D ve N_D^* sırasıyla deneysel ve kuramsal verici yoğunluklarıdır.

Fermi enerji düzeyini hesaplamak için aşağıdaki denlem kullanılır;

$$E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (2.23)$$

Burada N_C iletim bandındaki etkin durum yoğunluğudur ve aşağıdaki denklemlerle bulunur;

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.24)$$

Burada m_e^* elektronların etkin kütlesidir (Si için $m_p^* = 0.98m_0$).

C-V grafikleri yardımıyla bulunan bariyer yüksekliği;

$$\phi_{b(C-V)} = V_d + E_F - \Delta\phi_b \quad (2.25)$$

Tüketim bölgesi genişliği aşağıdaki eşitlikle verilir;

$$W_D = \sqrt{[(2\epsilon_s V_0)/qN_D]} \quad (2.26)$$

Burada $\Delta\phi_b$ Schottky bariyer alçalmasıdır ve aşağıdaki gibi açıklanır;

$$\Delta\phi_b = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.27)$$

E_m maksimum elektrik alan olup;

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_A V_d}{\epsilon_s}} \quad (2.28)$$

İle gösterilir.

C-V ölçümleri kullanılarak seri direnç R_s takip eden denklemden hesaplanır.

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (2.29)$$

Burada ω açısal frekanstır.

N_{ss} değerleri düşük (C_{LF}) ve yüksek (C_{HF}) frekans kapasite ölçümleri yapılarak denklem (2.30) yardımıyla bulunabilir (Nicollian ve Brews 1982).

$$N_{ss} = \frac{1}{qA} \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_0} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_0} \right)^{-1} \right] \quad (2.30)$$

Burada $C_0 = \epsilon_0 A / d_i$ olup boş kapasitörün kapasitansdır.

2.8 Dielektrik Malzemeler

Dielektrikler elektriksel olarak yalıtkan olmalarına rağmen, dış elektrik alan altında yük depolayabilen ve yüksek polarizasyon kabiliyetine sahip malzemelerdir. Dielektrik malzeme elektrik alanına yerleştirildiğinde, elektrik yükleri iletken malzemede olduğu gibi malzemenin içinden geçemezler, ancak elektrik alan yönünde konumlanırlar ve dielektrik polarizasyona neden olurlar. Bir elektrik alanına yerleştirilen dielektrik malzemenin tek hareketi, artı ve eksi yüklerin karşıt taraflara minimal konum değiştirmeleridir. Dielektrik kutuplanma nedeniyle, pozitif yükler alan yönünde konumlanırken, negatif yükler ters yönde yer değiştirir. Bu, dielektrik içinde bir uçtan diğerine uzanan bir iç elektrik alanının oluşmasına neden olur.

A yüzey alanına ve d plakaları arası mesafeye sahip paralel plakalı bir kondansatörün voltaj uygulanırsa plakalar birikmeye başlar. Plakalardan birine +Q, diğerine -Q toplanırsa, plakalar arasındaki elektrik alan aşağıdaki denklemle verilir.

$$E = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (2.31)$$

Burada ε_0 boş alanın geçirgenliği (8.85×10^{-12} F/m) ve σ_0 yüzey yük yoğunluğu olarak adlandırılır. Aralarında d mesafesi olan paralel plakalar arasındaki potansiyel fark, denklem 2.34'de verilmiştir.

$$V = E = \frac{\sigma_0 d}{\varepsilon_0} \quad (2.32)$$

Bu durumda kapasite (2.35) denklemi ile tanımlanır.

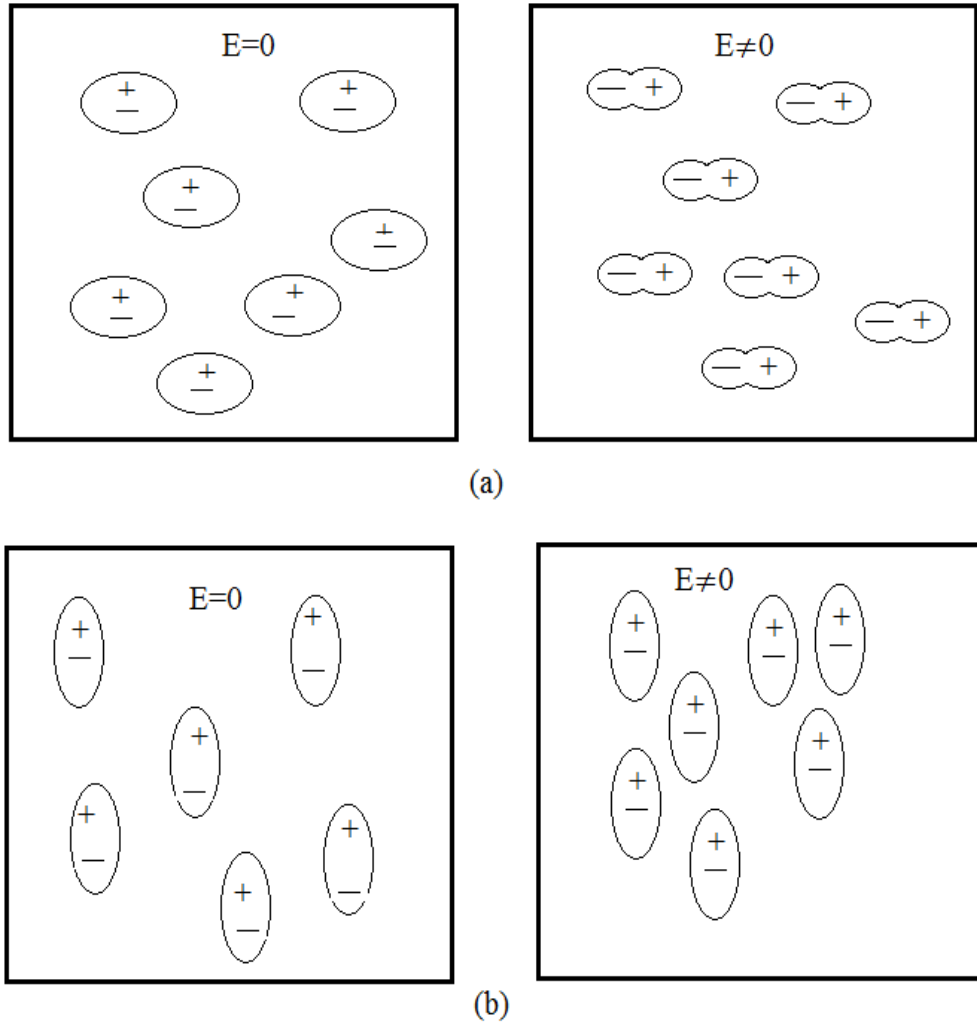
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{A\varepsilon_0}{d} \quad (2.33)$$

Plakalar arasına dielektrik malzeme yerleştirildiğinde, potansiyel farkında bir azalma meydana gelir. Bu azalma, malzeme ile levhalar arasındaki yüklerin birbirini nötralize etmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, plakalar arasındaki potansiyel fark, uygulanan potansiyel farka eşit olana kadar biraz daha yük biriktirilmeye devam eder. Böylece kapasitör daha fazla şarj olur. Dielektrik malzeme içermeyen kapasitörün potansiyel farkı ΔV_0 ile tanımlanırsa, uygulanan potansiyel farktaki azalma malzemenin ε dielektrik sabiti ile orantılıdır. Buna göre, kapasitörde daha fazla yük biriktirilir.

$$\Delta V = \frac{\Delta V_0}{\varepsilon} \quad (2.34)$$

$$C = \frac{A\varepsilon}{d} = \varepsilon C_0 \quad (2.35)$$

Bazı moleküllerin yapılarında pozitif ve negatif yükler örtüşmez ve bir elektrik dipolü vardır. Bunlara polar moleküller denir. Elektrik alanı olmadığında bile kalıcı dipol momentleri vardır. Öte yandan, bazı moleküllerin normalde dipol momentleri yoktur. Ancak bir dış elektrik alanında, pozitif ve negatif yüklere etki eden zıt yüklerin etkisiyle bir dipol momentleri kazanırlar. Bu maddelere polar olmayan moleküller denir. Şekil 2.12, polar ve polar olmayan moleküllerin polarizasyonunu göstermektedir.



Şekil 2.8 (a) polar olmayan moleküller ve (b) polar moleküllerin kutuplanması

2. 9 Yapıların Dielektrik Parametreleri

Yapının kompleks dielektrik sabiti denklem 2.41' de verilmiştir.

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (2.39)$$

Eşitlik 2.39'da ϵ' dielektrik sabiti, ϵ'' dielektrik kayıp ve $\tan \delta$ kayıp tanjant olarak tanımlanır;

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} = \frac{Cd_i}{\epsilon_0 A} \quad (2.40)$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{G d_i}{\varepsilon_0 \omega A} \quad (2.41)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.42)$$

Burada $C_0 = \varepsilon_0 A / d_i$ olup boş kapasitörün kapasitansdır. d_i yalıtkan tabaka kalınlığıdır. A diyot alanı ve ε_0 boş uzayın dielektrik sabitidir.

Dielektrik malzemenin ac elektriksel iletkenliği σ_{ac} aşağıdaki gibi belirtilmiştir;

$$\sigma_{ac} = \omega C \frac{d}{A} \tan \delta = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0 \quad (2.43)$$

Elektriksel modülüs parametresi M^* aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + iM'' \quad (2.44)$$

Burada M' ve M'' elektrik modülüsün sırasıyla gerçek ve kompleks bölümlerdir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

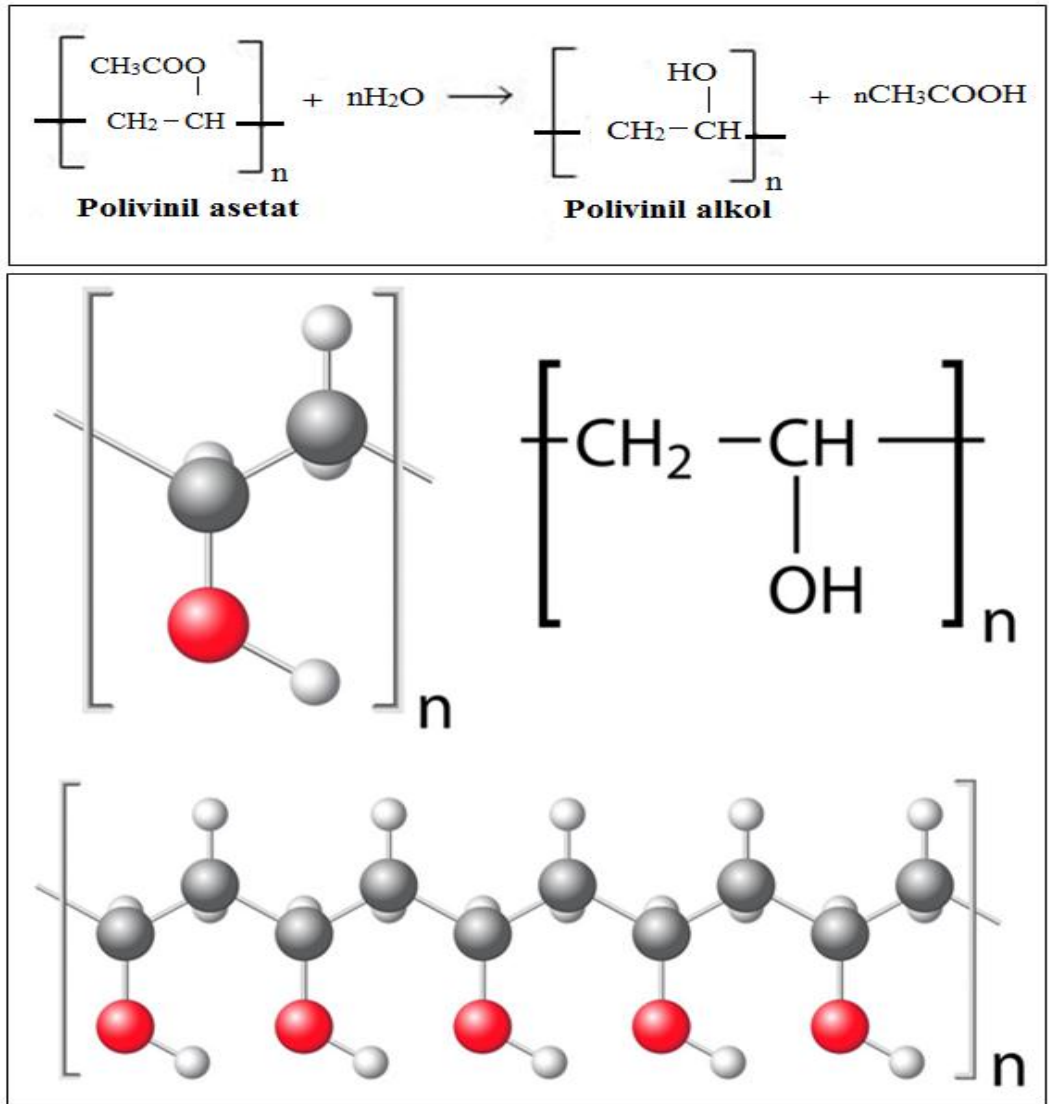
$$M' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (2.45)$$

$$M'' = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (2.46)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 PVA'nın Temel Nitelikleri

Sentetik PVA beyaz toz halde 1936 yılında ilk olarak üretilmiştir. PVA olarak kısaltılabildiği gibi PVAL ya da PVOH olarak da kısaltılabilir. PVA'nın elde edilmesi sırasında ilk olarak asetik asit ile etilenden vinil asetat polimerize edilir. Daha sonra bu polimerizasyondan elde edilen polivinil asetatın hidrolizinden de PVA üretilir. PVA adı verilen polimerin hidroliz ve polimerizasyon sürecine göre değişik türleri vardır.



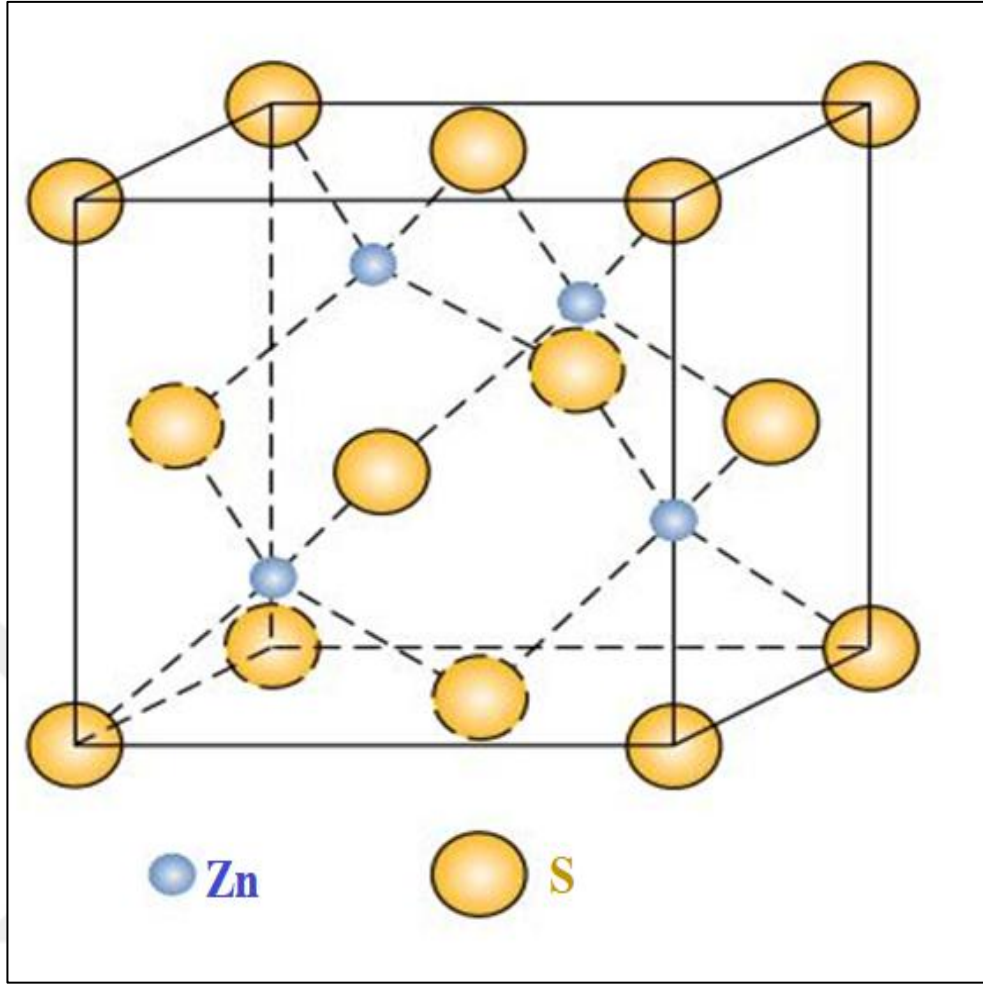
Şekil 3.1 PVA Sentez Reaksiyonu ve Atom Dizilimi

PVA'nın yapısında suda çözünebilen (hidrofilik) OH grubu olduğu için PVA'da suda çözünen bir polimerdir. Formül sel gösterimi ($C_2H_4O_x$) şeklindedir. Sentetik bir malzemedir ve şu zamana kadar doğada kendiğinden bir reaksiyon ile ortaya çıkmamıştır. Polivinil alkol türleri moleküler ağırlığı ve hidroliz derecesine göre sınıflandırılır. PVA'da molekül ağırlığı viskozite olarak ifade edilir. Kokusu olmayan, solventlere dayanıklı, beyaz renkte, sulu çözeltisi nötr veya asidik olan bir polimerdir. Erime sıcaklığı $212\text{ }^{\circ}\text{C} - 267\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir. Suda iyi çözünürken diğ er organik çözücülerde çözünmez. Ayrıca molekül ağırlığı azaldıkça suda daha kolay çözünür. Yoğunluğu $1,19 - 1,31\text{ g/cm}^3$ aralığındadır.

Organik polimer tabakalar büyütme aşamalarının kolay olması, elastikiyeti, hafifliği ve ucuzluğu gibi olumlu yönleri nedeniyle yalıtkan/oksit arayüzey tabakalar yerine kullanılmaktadır. Bu büyütülen polimer türleri içinde PVA'nın ayrıca ışığa karşı duyarlı oluşu, toksik olmaması, dielektrik sabitinin çok büyük oluşu, maliyetinin düşük olması, yüzey aktif bir madde oluşu gibi daha birçok yararlı tarafı olduğundan arayüz tabaka katkı olarak tercih edilmektedir.

3.2 Çinko Sülfür (ZnS) Bileş iğ inin Temel Özellikleri

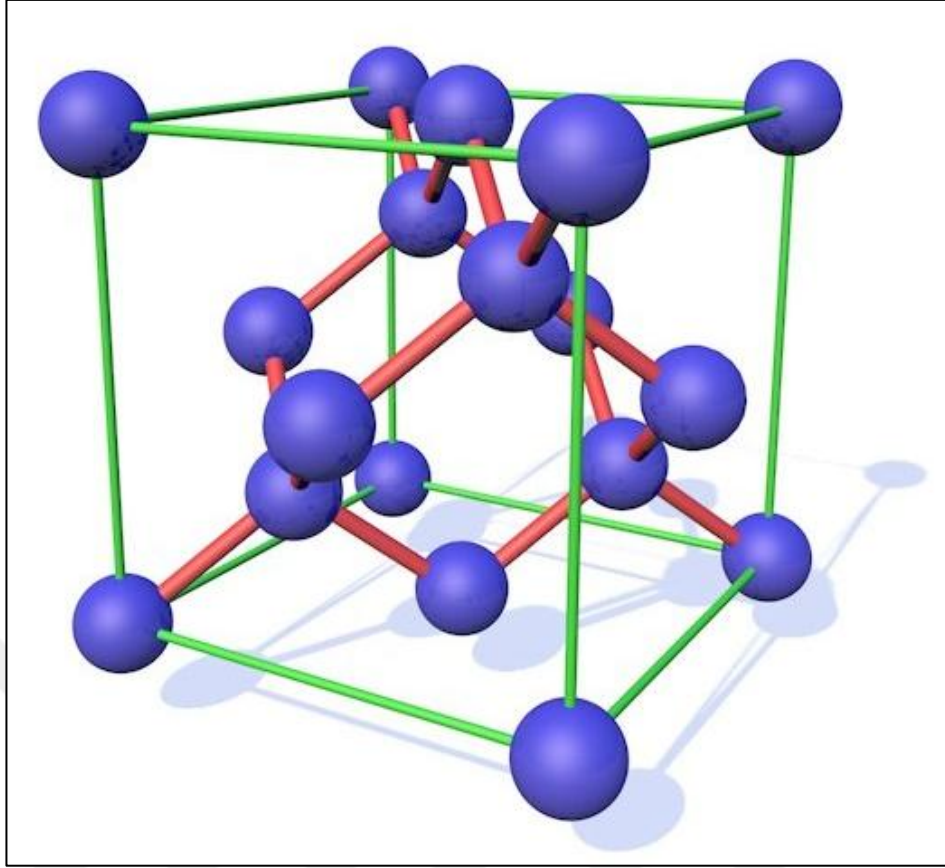
İnorganik bir bileşik olan çinko sülfür diğ er bir deyiş le çinko sülf itin kimyasal formülü ZnS şeklindedir. ZnS iki ana kristal formda bulunur. Bulunduğ u her formunda Zn ve S'deki koordinasyon geometrisi dört yüzlüdür. Daha kararlı kübik formu çinko blende ya da sfalerit olarak bilinir. Altıgen formu mineral (wurtzite) olarak bilinir ancak sentetik olarak üretilebilir. Sfalerit formundan mineral formuna geç iş yaklaşık $1020\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de gerçekleşir. Beyaz kristal veya toz formdadır. Süblimleş me (katı halden direkt gaz hale geç iş) sıcaklığı $1185\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken erime sıcaklığı $1850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Suda oldukça iyi çözünür. ZnS'in hem wurtzite hem de sfalerit formu geniş band aralıklı yarıiletken dir. Bunlar prototipik II-IV grubu yarıiletkenlerdir. ZnS'in kübik formu $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $3,54\text{ eV}$ luk bant genişliğine sahipken hekzagonal (altıgen) formunun bant aralığı $3,91\text{ eV}$ 'tur.



Şekil 3.2 Çinko sülfür (ZnS) kristal yapısının birim hücresi

3.3 Silisyumun (Si) Temel Özellikleri

Uygulamada en çok kullanılan yarıiletkenlerden olan silisyum (Si) %26 oranıyla tabiatta çok var olan elementler sıralamasında ikinci sıradadır. 14 olan atom numarasıyla periyodik cetvelde IV A grubunda yer alır.



Şekil 3.3 Silisyum (Si) kristalinin 3D kafes yapısı

Silisyum oda sıcaklığında karbon elementi gibi inaktif iken ısıtıldığı zaman bazı metallerle güçlü bir reaksiyona girer. Asidik ortamlarda Si' nin bağları çok kuvvetli olduğundan tıpkı karbon gibi reaksiyonu başlatmak için yüksek enerjiye gereksinim duyar.

Bilgisayar çipleri, LED ekranlar, transistörler ve daha pek çok elektronik aygıtlarda silisyumun ileri derecede saflaştırılmış hali sıkça kullanılmaktadır. Silisyum dioksit (SiO_2 -silika) ile silikatlar (SiO_4) en bilinen silisyum bileşikleridir.

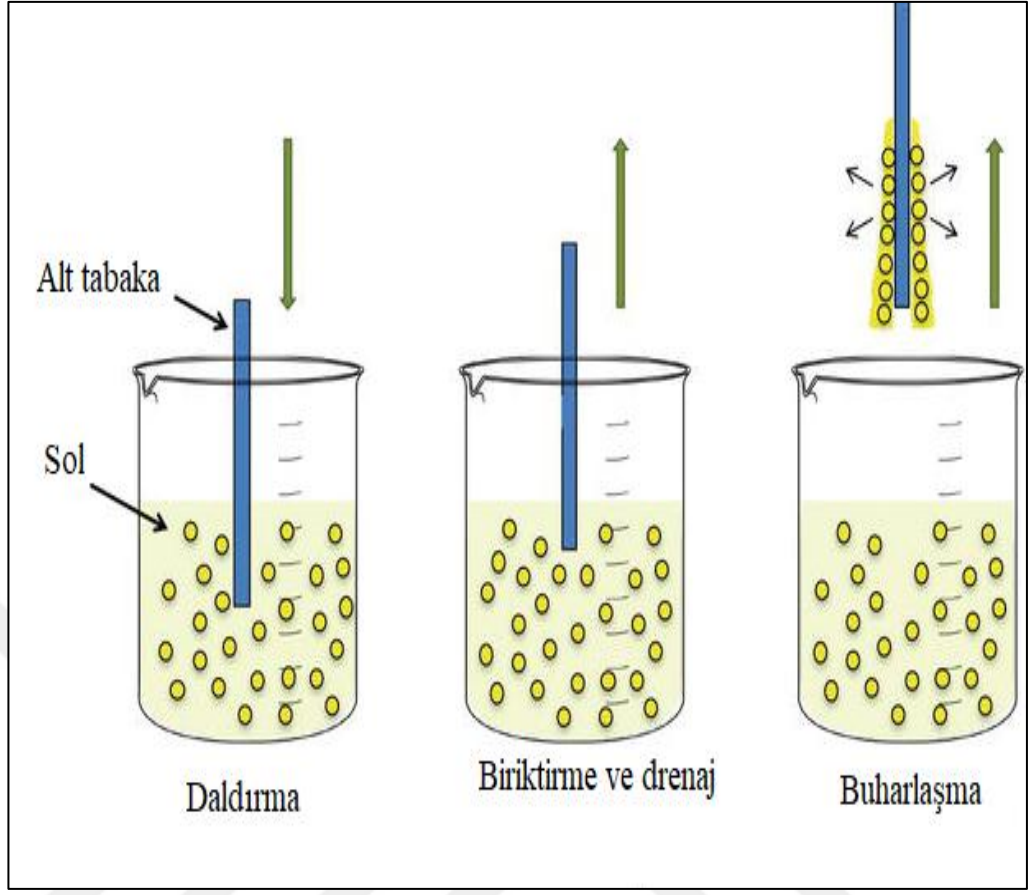
Çizelge 3.1 Silisyumun bazı özellikleri

Özellikleri	Değeri
Atom ağırlığı	28,09
Kristal Yapı	Elmas
Yoğunluğu	2,328 g/cm ³
Dielektrik sabiti	11,9
N _c	2,8x10 ¹⁹ cm ⁻³
N _v	1,04x10 ¹⁹ cm ⁻³
n _i	1,45 x10 ¹⁰ cm ⁻³
Yasak enerji bant aralığı	1,12 eV
Örgü sabiti	5,43 Angstrom

3.4 Sol-Jel Daldırma Yöntemi

Sol-Jel yöntemi kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan sol (katı maddelerin sıvı süspansiyonu içindeki durumu) halden jel hale (katı) geliş sürecine denir. Bu yöntemle seramik fiberler, ultra ince tozlar, ince film kaplamalar gibi pek çok farklı özellikli malzemeler üretilir. Altlık üstünde daldırma ya da döndürme metotlarıyla jel film elde edilir. Üzerinde jel bulunan altlığın ısıya maruz bırakılmasıyla da ince film oluşmuş olur şekil (3.5). Yer çekimine oranla moleküller arasındaki Van Der Wals etkileşimleri daha fazla olduğundan sıvı süspansiyon içindeki katı malzeme çökelti oluşturmaz. Sıvı içinde asılı haldedir. Molekül genişleyerek eğer ki çözeltide büyürse buna artık jel adı verilir.

Bu yöntem ilk olarak 1846 yılında Ebelmen isimli bilim adamı tarafından bulunmuştur. SiO₂ ile ince film hazırlama işlemi ise 1939 yılında Alman bilim adamı W. Geffcken tarafından yapılmıştır. Günümüzde ise malzemelerin kimyasal ve nem dayanıklılığının artırılması, gözenekli film oluşturma, camların buzlanmaya karşı korunması, otomotiv, elektronik ve gıda gibi sanayi sektöründe faydalanılmaktadır.



Şekil 3.4 Sol-Jel Daldırma Yöntemi Aşamaları

3.5 Alt Tabakaların Temizlenmesi

Alt tabakaların temizlik aşaması üretilen filmlerin kalitesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada p-tipi Si kristali kullanılmıştır. Kullanılan p-tipi Si kristalinin kalınlığı 140 μm öz direnci ise 1-20 Ωcm dir. Si kristalleri sol-jel yöntemiyle kaplanmadan önce RCA metoduyla temizlenmiştir. Bu yöntem üç aşamadan oluşan bir temizleme yöntemidir.

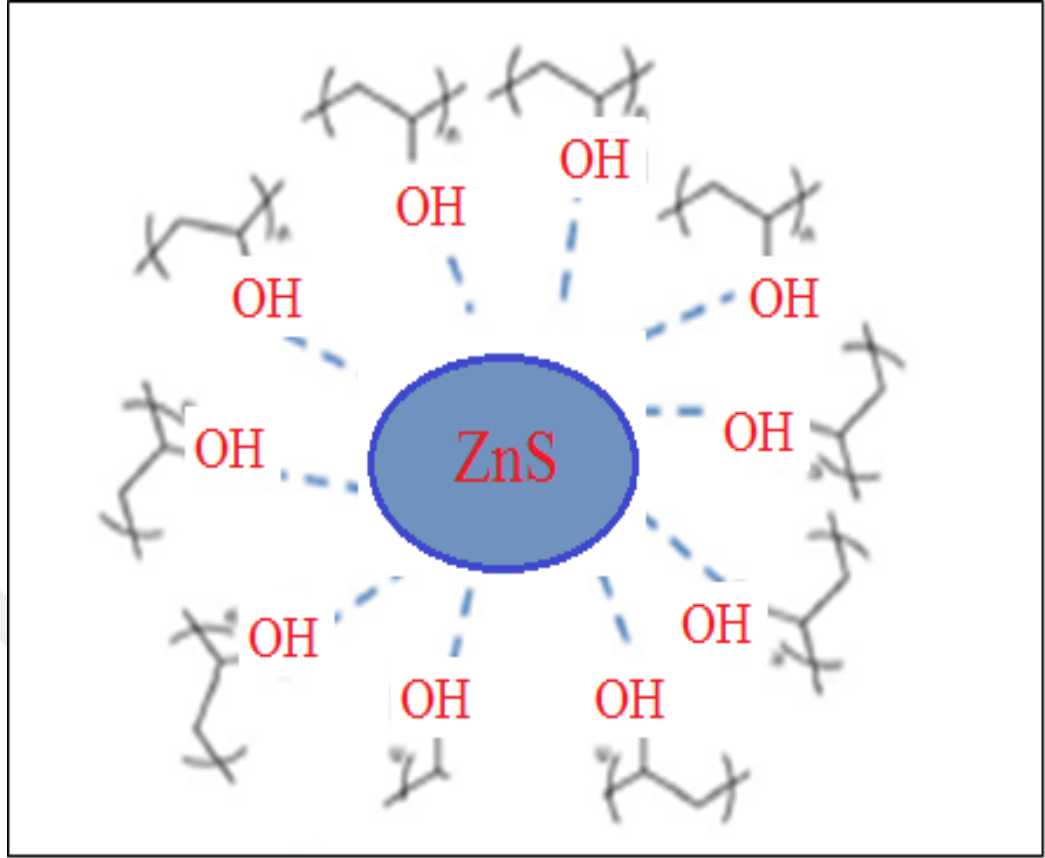
Birinci aşama 'organik temizleme' aşamasıdır. 1ölçek NH_4OH (Merck), 1 Ölçek H_2O_2 (Merck) ve 5 ölçek de deiyonize 18 M Ω değerinde deiyonize su karıştırılıp içine Si alt tabakalar konmuş ve süreyle 60-70 $^{\circ}\text{C}$ 'de 10 dakika tutulmuştur.

İkinci aşama ise ‘oksit temizleme’ aşamasıdır. 1ölçek HF (Merck) ve 10 ölçek 18 MΩ değerinde deiyonize su birleştirilerek içine Si alt tabakalar yerleştirilip yarım dakika süreyle ultrasonik temizleyicide bekletilmiştir.

Üçüncü aşama ‘iyonik temizleme’ aşamasıdır. 1ölçek HCl (Merck), 1 ölçek H₂O₂ (Merck), 6 ölçek 18 MΩ değerinde deiyonize su karıştırılıp içine Si alt tabakalar yerleştirilerek 10 dakika süreyle ~60 °C civarında tutulmuştur. Son olarak alt tabakalar kutulurak temizleme işlemi bitirilmiştir.

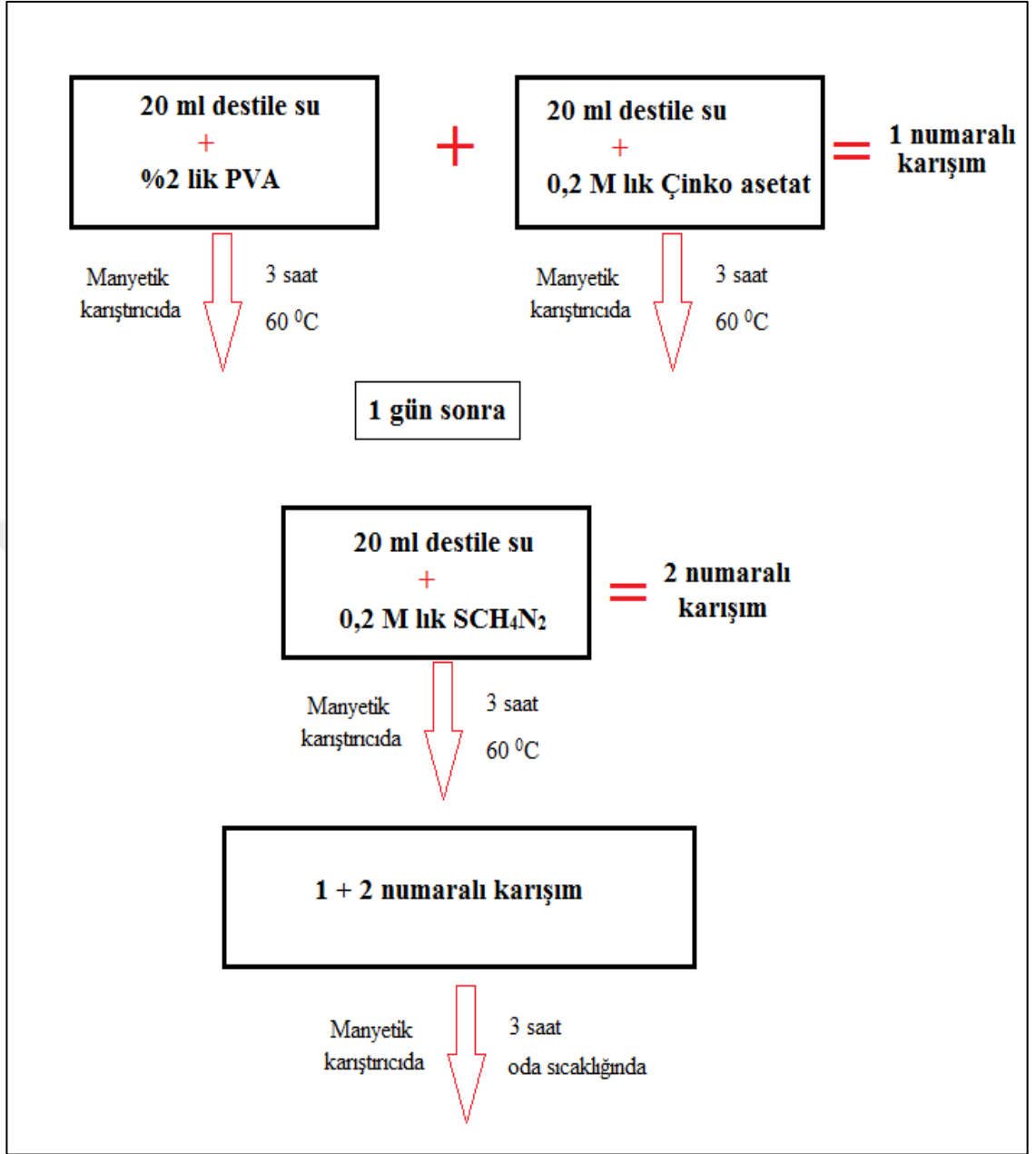
3.6 ZnS-PVA Çözeltisinin Hazırlanışı ve Doğrultucu Kontakların Yapımı

Bu aşamada bir PVA matrisine gömülü ZnS nanoparçacıkları, ıslak kimyasal yöntemlerle sentezlendi. Kullanılan tüm kimyasallar Merck marka olup daha fazla saflaştırılmadan kullanılmıştır. Tipik sentezleme prosedürü şu şekildedir. İlk olarak PVA çözeltisi hazırlanmıştır. Bunun için 20 ml destile su ile %2'lik polivinil alkol polimeri manyetik karıştırıcıda 60 °C de 3 saat süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra 0,2 M lık çinko asetat çözeltisi [Zn (CH₃OO)₂] 20 ml destile suyla manyetik karıştırıcıda 60 °C’de 3 saat süreyle karıştırılmıştır. 1 gün sonra 0,2 M lık tiyoüre (SCH₄N₂) çözeltisi 20 ml distile suda 60 °C de 3 saat süreyle karıştırılmıştır. Son olarak PVA’lı karışım ile SCH₄N₂ karışım birleştirilir. 3 saat süreyle oda sıcaklığında karıştırılır. Sonuçta bulanık renkli bir sıvı karışım olan ZnS-PVA çözeltisi oluşur. Çözelti hazırlama işlemi şekil 3.7’de şematik olarak görülmektedir.

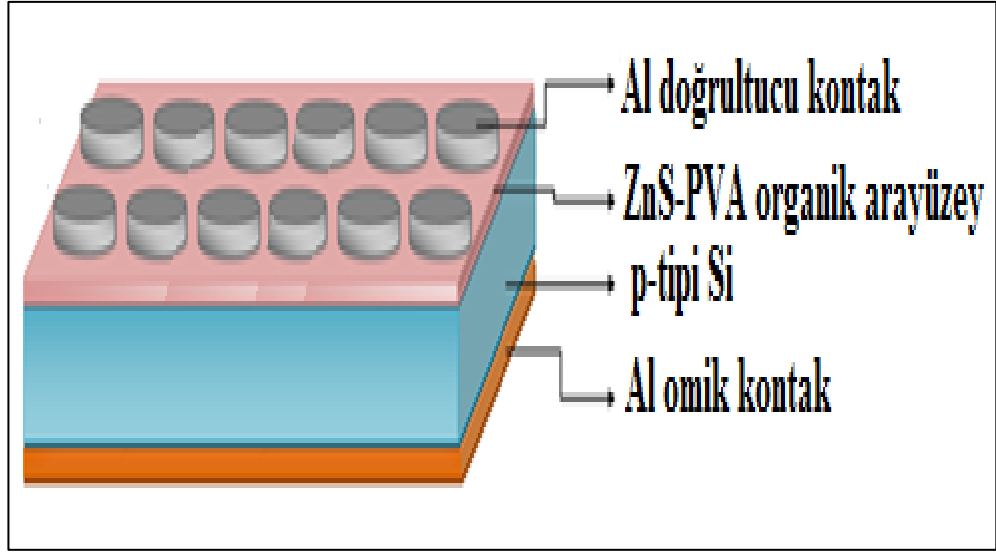


Şekil 3.5 ZnS-PVA etkileşiminin şematik gösterimi

Temizlenen p-tipi Si tabakaların arka yüzeylerinin tamamı tungsten flamanda yüksek saflıkta Al (99.999%) parçaları 10⁻⁶ Tor basınç altında buharlaştırılarak Al kaplanmıştır. Arka yüzeyleri Al kaplı silikon tabakalar daha düşük omik kontak elde edilmesi için 580 °C fırında 10 dakika tavlannmıştır. Daha sonra p- Si'nun ön yüzeyine ZnS-PVA çözeltisi sol-jel daldırma yöntemi ile kaplanmıştır. Daldırma işlemi ev yapımı motorlu sistemle yapılmış ve her numune 3 ve 5 kez daldırılmıştır. Her daldırma işleminden sonra numuneler 300 °C'de tekrarlanan tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Böylece Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS)/Al yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 3.6 Çözelti hazırlama aşamaları



3.7 Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotların diyagramı

3.7 Kullanılan Cihazlar

Alttabakaların temizlik aşamalarında Human Zeneer Power marka deiyonize su cihazı, Branson 12 marka ultrasonik banyo ve Clifton Ceraster marka manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Filmlerin kaplanması bilgisayar kontrollü 0-24 V dc motorlu bir sistemden yararlanılmıştır. Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS)/Al yapısının metal kontaktları Key High (yüksek) Vacuum (vakum) sisteminde yapılmıştır. Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) ve Au/Fe₃O₄-PVA/n-Si (MPS) yapılarının düşük sıcaklıklarda (I-V) ölçümlerinde bilgisayar kontrollü Keithley 2400 sabit akım kaynağı, Lake Shore 331 sıcaklık kontrolcüsü ve Janis CCS-350S krostat kullanılmıştır. Ölçüm sistemi şekil 3.8 de gösterilmiştir. Au/Fe₃O₄-PVA/n-Si (MPS) yapısının (C-V) ve (C-F) ölçümleri şekil 3.9 da gösterilen HP 4192A empedans analizörü ile gerçekleştirilmiştir. Osilatör genliği 50 mV seçilmiştir.



Şekil 3.8 Elektrik ölçümlerinin yapıldığı sistem

Şekil 3.8’de (C-V), (I-V), (C-f) ölçümlerinin yapıldığı sistem görülmektedir. Ayrıca şekil 3.9’da da empedans analizörü olarak kullanılan Hawlett Peckard marka empedans çözümleyici görülmektedir.



Şekil 3.9 Hassas elektriksel empedans çözümleyici

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

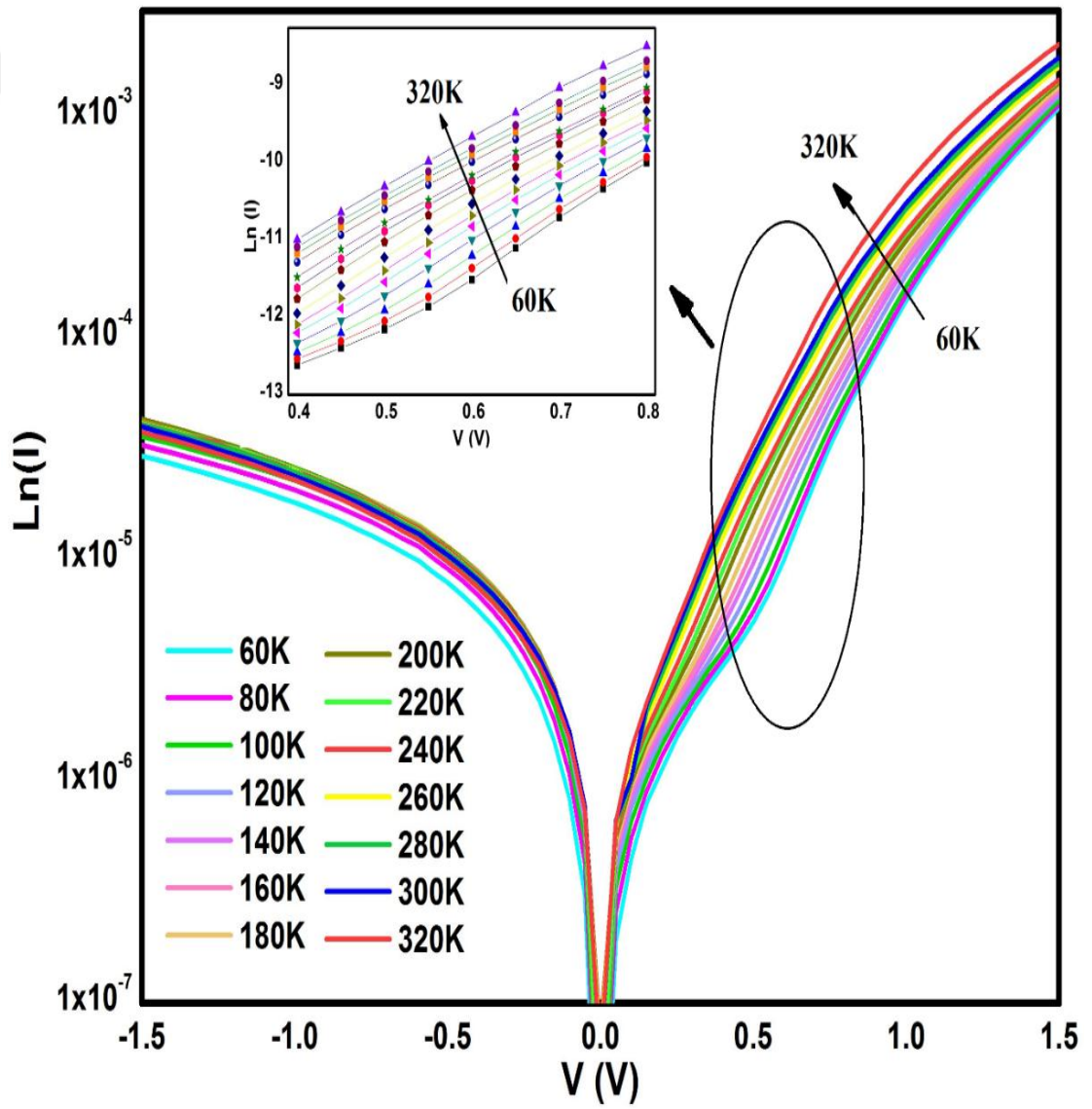
MS, MIS, MPS türdeki SBD yapılarında M-S arayüzeyindeki bariyerin yapısı, büyütülen arayüzey tabakanın yapıda oluşturduğu değişiklikler ve yapıdaki akım-iletim mekanizmaları günümüzde bilim insanlarının popüler araştırma konularındandır (Pakma vd. 2008, Janardhanam vd. 2009, Reddy 2015, Özden vd. 2022). Genellikle doğru beslem I-V ile ters beslem C-V ölçümleri diyotların temel parametrelerinin saptanmasında kullanılmaktadır. Hesaplamalar genellikle Termionik emisyon teorisine göre yapılır. Ancak bilhassa düşük sıcaklıklarda TE teorisinden farklılıklar olmuştur. Farklılıklardan kasıt, sıcaklık arttıkça literatürde verilenin tersine Φ_{B0} dediğimiz bariyer yüksekliğinin artması, idealite faktörünün ise sıcaklık azaldıkça 1'den çok büyük değerler alması, geleneksel Richardson eğrisinin sıcaklık azaldıkça lineerlikten uzaklaşmasıdır. Yapılan çok sayıdaki araştırmalara karşın bu tip yapılarında halen geniş bir sıcaklık aralığında uygulanabilecek iletkenlik mekanizmaları tam olarak saptanamamıştır (Chattopadhyay ve Halder 1999, Reddy 2015). Bunun sebebi sıcaklık aralıkları değiştikçe bir ya da birden fazla akım-iletim mekanizmasının geçerli olması olabilir. Geçerli akım-iletim mekanizmalarının bulunabilmesi için ölçümlerin geniş bir sıcaklık ve gerilim aralığında yapılması gereklidir. Yapının elektriksel ve dielektriksel olarak araştırılması konusunda gerilim ve frekans değerleri değiştirilerek yapılan C-V ölçümleri neticesinde akım iletim mekanizmaları da aydınlatılmaktadır (Chelkowski 1980, Parlaktürk vd. 2008, Tunç vd. 2011, Kaya vd. 2014, Şafak-Asar vd. 2015).

Bu çalışmada, Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi SBD'ler hazırlanmış ve yapının karanlıkta I-V ölçümleri ± 3 V aralığında ve 60 K-320 K sıcaklık aralığında 20 K aralıklarla yapılmış. Bu ölçümlerden diyot parametreleri hesaplanarak akım-iletim mekanizması belirlenmiştir. Diğer bir MPS yapısı olan Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si diyodunda ise karanlıkta I-V ve C-V ölçümleri 80-320 K sıcaklık aralığında 20'şer K aralıklarla gerilime karşı yapılmıştır. C-V ölçümleri oda sıcaklığında frekansa bağlı olarak 0.3 kHz -1 MHz ölçülmüştür. Bu yapının akım-iletim mekanizması, elektrik modülü parametreleri ile dielektrik özellikleri belirlenmiştir.

4.1 Akım-Gerilim (I-V) Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Belirlenmesi

4.1.1 Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si (MPS) diyotlar

Şekil 4.1 de laboratuvarımızda hazırladığımız Al/ZnS- PVA/p-Si (MPS) diyotlara ait sıcaklık olarak 60-320 K arasında 20 K arttırarak bulunan düz ve ters beslem yarı-logaritmik $\ln I$ -V grafiği görülmektedir. Şekilden Al/ZnS-PVA/p-Si yapıların doğrultma özelliği sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.1 Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si (MPS) yapılarda yarı-logaritmik $\ln I$ -V belirtkenleri

Diyotların doğrultma oranı $RR=I_F/I_R$ ile gösterilir ve aynı gerilim değerinde I_F düz beslem akımının, I_R ters beslem akımına oranı olarak tanımlanır ve yapıya ait doğrultma oranları Çizelge 4.1 de gösterilmiştir. Doğrultma oranının sıcaklığa bağlı değişimi yapıda birden çok akım-iletim mekanizmasının varlığını sergilemektedir. Şekil (4.1) de ters beslem gerilim bölgesinde akımın bir doyuma ulaşamamasının sebebi olarak arayüzey tabakasının varlığı ile Φ_B nin sanal kuvvetler sebebiyle küçülmesi düşünülebilir (Nicollian ve Brews 1982, Tung 1992, Vural vd. 2010). Denklem (4.2)'den yararlanılarak idealite faktörü, $\ln I$ - V grafiğinin doğrusal kısımlarının eğiminden her sıcaklık değeri için hesaplanmış ve çizelge 4.1 de verilmiştir.

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln(I)} \right) \quad (4.2)$$

Elde edilen n değerleri 1'den büyüktür ve sıcaklık azalırken arttığı görülmüştür. İdeal diyot için idealite faktörünün değeri 1'dir. Üretilen diyotlar da arayüzey tabakası bulunduğundan n değeri denklem 2.17'den de görüleceği üzere arayüzey tabakasının kalınlığına, arayüzey tabakasının dielektrik sabitine ve arayüzey durumlarının yoğunluğuna bağlıdır ve 1'den çok büyüktür. Denklemden görülen parametrelerin dışında idealite faktörü, arayüzeyde oluşan potansiyel bariyere de bağlıdır. Bariyerin şekli ve yapısına göre n 'nin değeri değişiklik gösterebilir (Card ve Rhoderick 1973, Chattopadhyay ve Haldar 1999, Yahia vd. 2011, Tugluoglu vd. 2016).

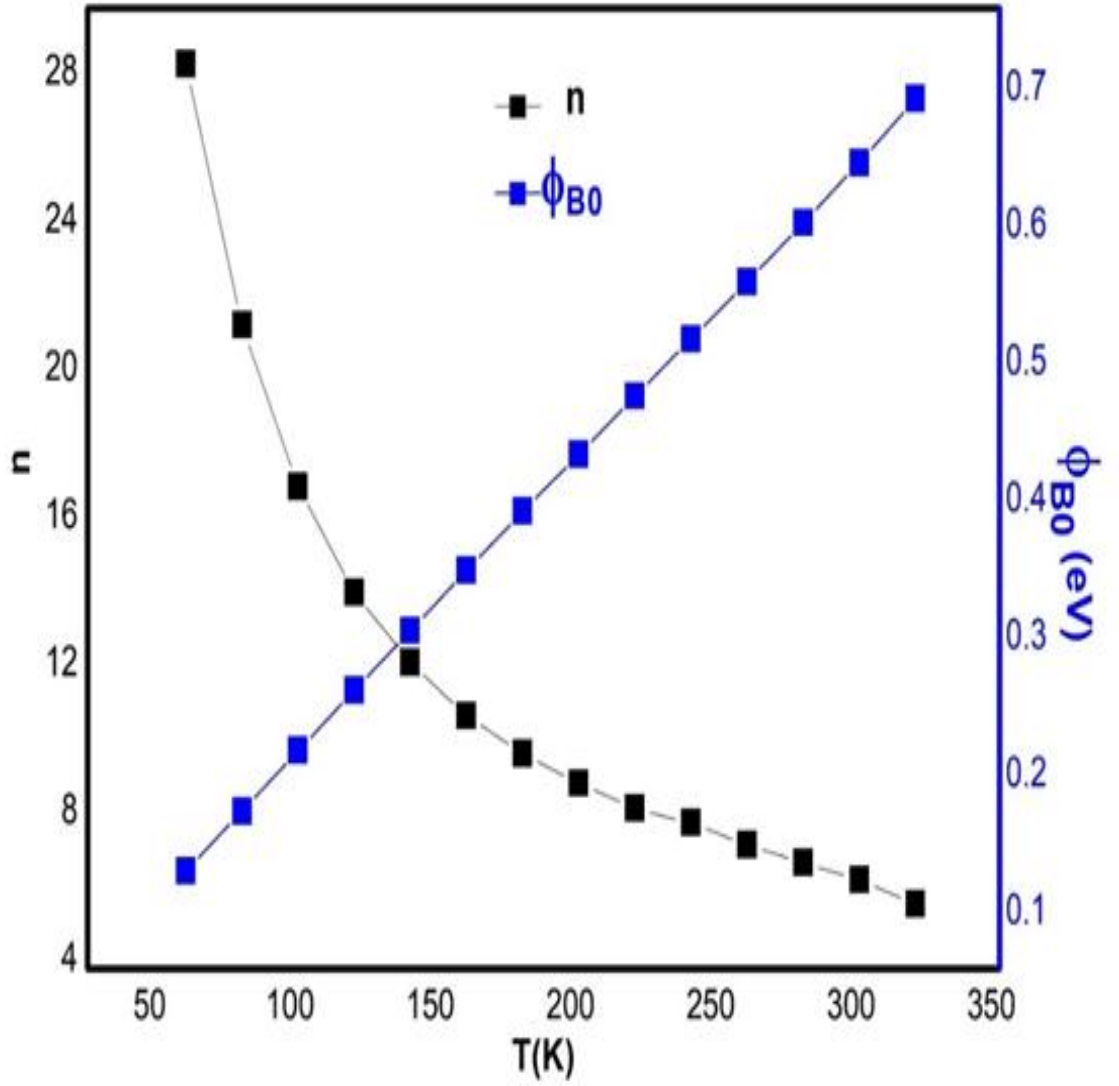
I_0 değerleri, Şekil 4.1 deki $\ln I$ - V grafiklerinin doğrusal bölgeleri $\ln I$ eksenine ekstrapole edilerek kesim noktalarından bulunmuştur. I_0 değerleri denklem (4.3)'de yerine yazılarak sıfır-beslem bariyer yükseklikleri elde edilmiştir. Bulunan I_0 ve Φ_{B0} değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir (Schottky 1938, Sharma 1984).

$$\Phi_{B0}(I - V) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.3)$$

Çizelge 4.1 Al/(ZnS katkılı PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun 60-320 K sıcaklık aralığındaki akım-gerilim (I-V) belirtkenleri

T (K)	I_0 (A)	n	Φ_{B0} (eV)	nT (K)	R_s (Ω)	I_F/I_R
60	1.89×10^{-7}	28.49	0.12	1709	1.53×10^2	122.83
80	2.12×10^{-7}	21.42	0.16	1714	1.96×10^2	116.03
100	2.37×10^{-7}	17.05	0.21	1705	1.97×10^2	108.05
120	2.78×10^{-7}	14.18	0.25	1701	2.16×10^2	99.45
140	3.41×10^{-7}	12.30	0.30	1722	2.38×10^2	96.19
160	4.00×10^{-7}	10.85	0.34	1736	3.24×10^2	90.82
180	4.95×10^{-7}	9.82	0.38	1767	3.75×10^2	85.54
200	6.42×10^{-7}	9.02	0.42	1805	4.03×10^2	84.10
220	7.75×10^{-6}	8.34	0.47	1836	9.35×10^2	87.90
240	9.71×10^{-6}	7.95	0.51	1907	9.68×10^2	90.62
260	1.18×10^{-6}	7.36	0.55	1914	1.10×10^3	90.93
280	1.33×10^{-6}	6.87	0.59	1924	1.32×10^3	94.89
300	1.44×10^{-6}	6.41	0.64	1924	2.06×10^3	96.38
320	1.42×10^{-6}	5.75	0.68	1841	3.20×10^3	97.54

Çizelge 4.1’de ölçüm alınan en düşük sıcaklık olan 60 K de I_0 , n ve Φ_{B0} ’ın sırasıyla $1,89 \times 10^{-7}$ A, 28,49 ve 0,12 eV olduğu, ölçüm alınan en yüksek sıcaklık olan 320 K de ise yine sırasıyla $1,42 \times 10^{-6}$ A, 5,75 ve 0,68 eV olduğu görülmektedir. Çizelge 4.1’ den anlaşılabildiği gibi I_0 doyum akımının değeri sıcaklık arttıkça artarken n idealite faktörünün değeri ise sıcaklığa bağlı olarak azalmaktadır. Φ_{B0} dediğimiz metal ile yarıiletken arasındaki bariyer yüksekliği ise sıcaklıkla doğru orantılı olarak artış göstermektedir.



Şekil 4.2 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotunda idealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin sıcaklığa göre değişimi

Şekil 4.2’de hazırladığımız diyetlerin idealite faktörü ile metal ile yarıiletken arasında oluşan bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişim grafiği çizilmiştir. İlk olarak n ’deki değişime baktığımızda özellikle düşük sıcaklıklarda değerinin 1’den çok büyük ve ideal durumdan oldukça uzak olduğunu görürüz. Grafiğe göre sıcaklık arttıkça idealite faktörünün değeri üstel olarak azalmaktadır. Φ_{B0} değeri ise sıcaklık değeri yükseldikçe lineer biçimde çoğalmaktadır (Şekil 4.2). Bu iki durum diyetlerdeki akım-iletim mekanizmasını klasik TE teorisiyle açıklayamayacağımızın kanıtıdır. Metal ile yarıiletken arasına büyüttüğümüz PVA’lı katman ve buradaki lokalize arayüzey durumlarının varlığı idealite faktörünün 1’e eşit olduğu ideal durumdan sapmaların

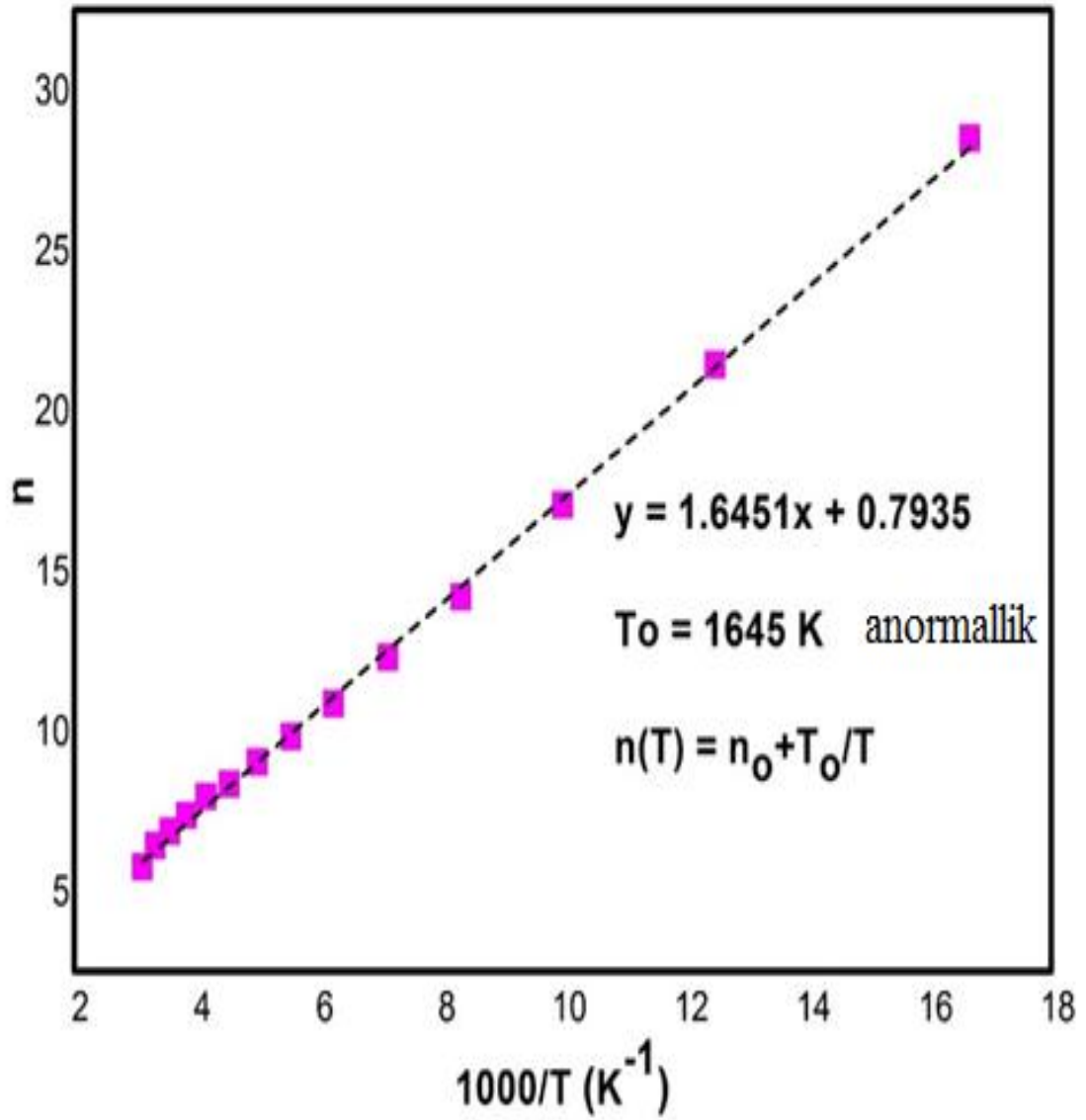
nedenidir. Polimerli arayüzey ile yarıiletken arasındaki arayüzey durumları, bariyerin homojen olmayışı düşük sıcaklıklarda n in çok büyük çıkmasının sebebidir. TFE ve FE teorileri n 'nin düşük sıcaklıklarda (örneğin 60 K de $n=28.49$) ideal durumdan çok uzaklaşmasının sebebini izah edemez. Bunun sebebi termoiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu teorilerinin katkı oranı yüksek olan yarıiletkenlerde düşük sıcaklıklarda geçerli olmasıdır (Sharma 1984, Sze 2007). Bu mekanizmaların etkin olmadığını anlayabileceğimiz bir gösterge de Çizelge (4.1) de de görebileceğimiz gibi $n \propto T$ değeri değişkendir. Halbuki nT değerinin, alan emisyonu teorisine göre değişmemesi gerekmektedir.

Metal ile yarıiletken arayüzeyindeki homojensizlikten dolayı idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri sıcaklığa bağlılık göstermiştir. M/S arayüzeyinde büyüklü küçüklü bariyercikler bulunduğu düşünülüp Φ_{B0} için çevresine bir Gaussian Dağılım (GD) fonksiyonu tanımlanmıştır (Tung 1991, Werner ve Güttler 1991, Karataş ve Altındal 2005, Gülnahar ve Efeoğlu 2009, Kavasoglu vd. 2010, Soylu ve Yakuphanoglu 2010, Gümüş vd. 2015, Dey vd. 2016, Horvarth 1996, Hudait vd. 2001). Denklem (2.4)'de her iki tarafın $\ln$ 'i alınıp $(\ln(I_0/T^2)-q/kT)$ grafiği çizildiğinde grafik doğrusal çıkmazken denklem (4.4)'ün her iki tarafının $\ln$ 'i alınıp $(\ln(I_0/T^2)-q/nkT)$ grafiği çizildiğinde doğrusal çıkıyorsa idealite faktörü (n) ile sıcaklık arasındaki ilişki Şekil (4.3) deki gibi lineerdir ve denklem (4.5) şeklindedir. Burada n_0 ve T_0 sabitlerdir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{B0}}{nkT}\right) \quad (4.4)$$

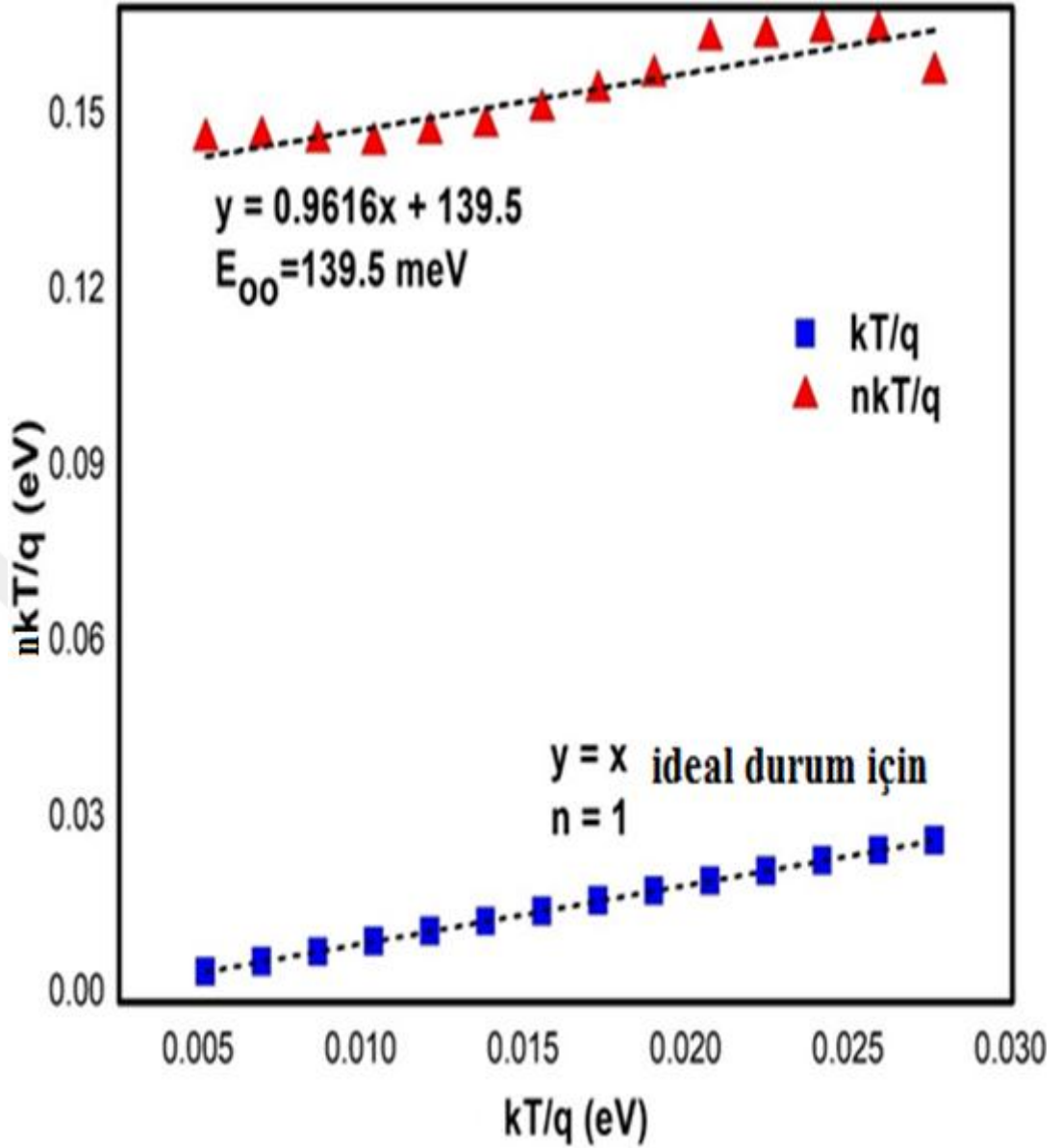
$$n(T) = n_0 + \frac{T_0}{T} \quad (4.5)$$

n_0 ve T_0 Şekil 4.3'deki grafiğin eğiminden ve y-ksenini kesme noktasından sırasıyla 0,7934 ve 1645 K bulunmuştur. İdealite faktörünün değeri sıcaklık arttıkça azalır (Şekil 4.2). Buna T_0 etkisi ya da 'anormallik' olarak adlandırılır.



Şekil 4.3 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun $n-1000/T$ grafiği

Şekil 4.4 de $(kT/q)-n(kT/q)$ grafiği görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotların (kT/q) değeri ile $n(kT/q)$ değerleri arasında doğrusal bir korelasyon vardır. Ayrıca idealite faktörünün 1'e eşit olduğu durumun eğrisi de Şek. (4.4)'de gösterilmiştir.

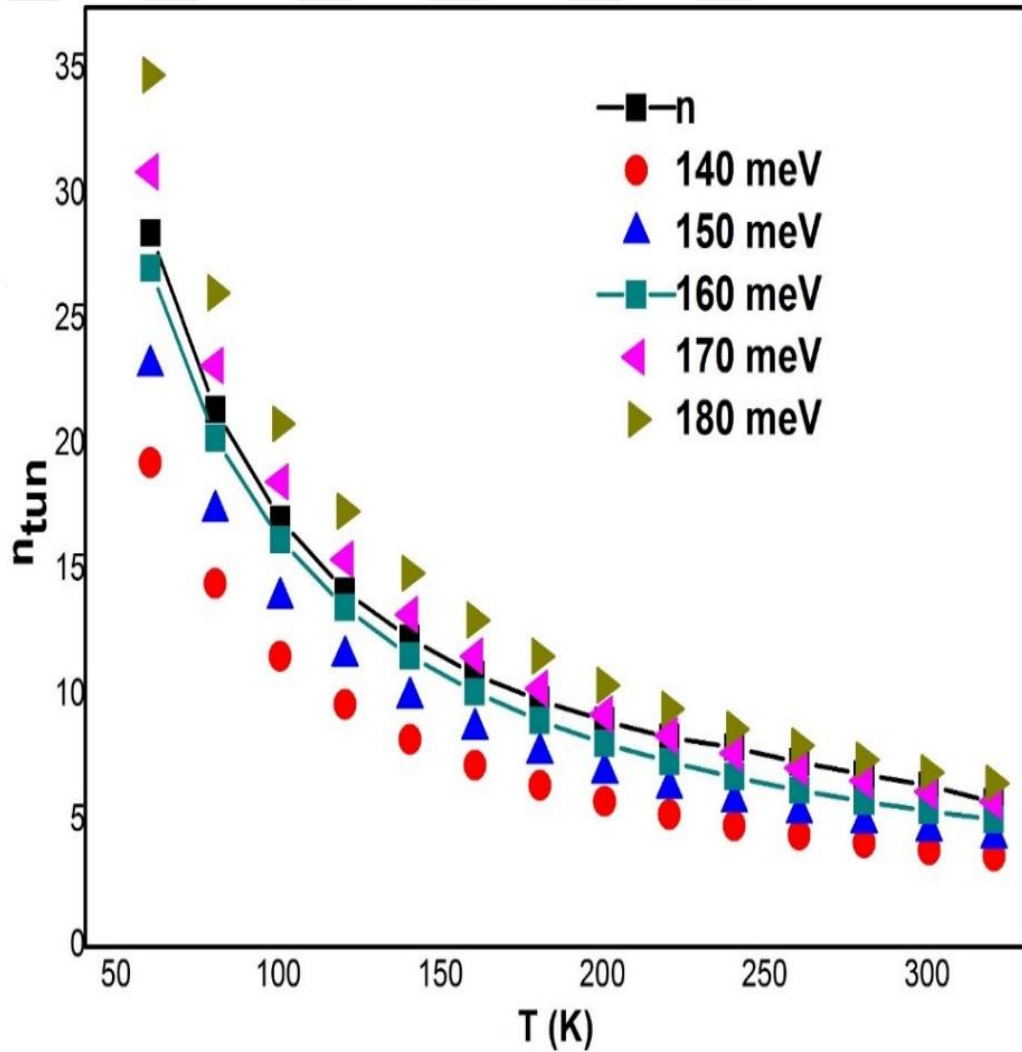


Şekil 4.4 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun n -1000/ T grafiği

Yukarıdaki şekilde eğri fit edildiğinde elde ettiğimiz denklemde de görülen eğrinin y-eksenini kestiği noktadan E_{00} tunelleme parametresi değerini deneysel olarak 139,5 meV buluruz. Bir yarıiletken, tunelleme mekanizması sadece düşük sıcaklıklarda ve yüksek katkı seviyelerinde hakim olabilir. Böylece W_d küçülür ve bu durumda da düşük sıcaklıkta bariyer üzerinden geçebilen yük sayısı artar. Dolayısıyla n değerinde artış meydana gelir. Fakat daha sonra, daha yüksek sıcaklıklarda E_F den daha yüksek yeterli enerjiye sahip taşıyıcılar tünel açmadan yarıiletken metale kolayca geçerler. Diğer bir deyişle FE ve TFE teorileri ancak dejenere yarıiletkenlere ($N \geq 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) geçerli

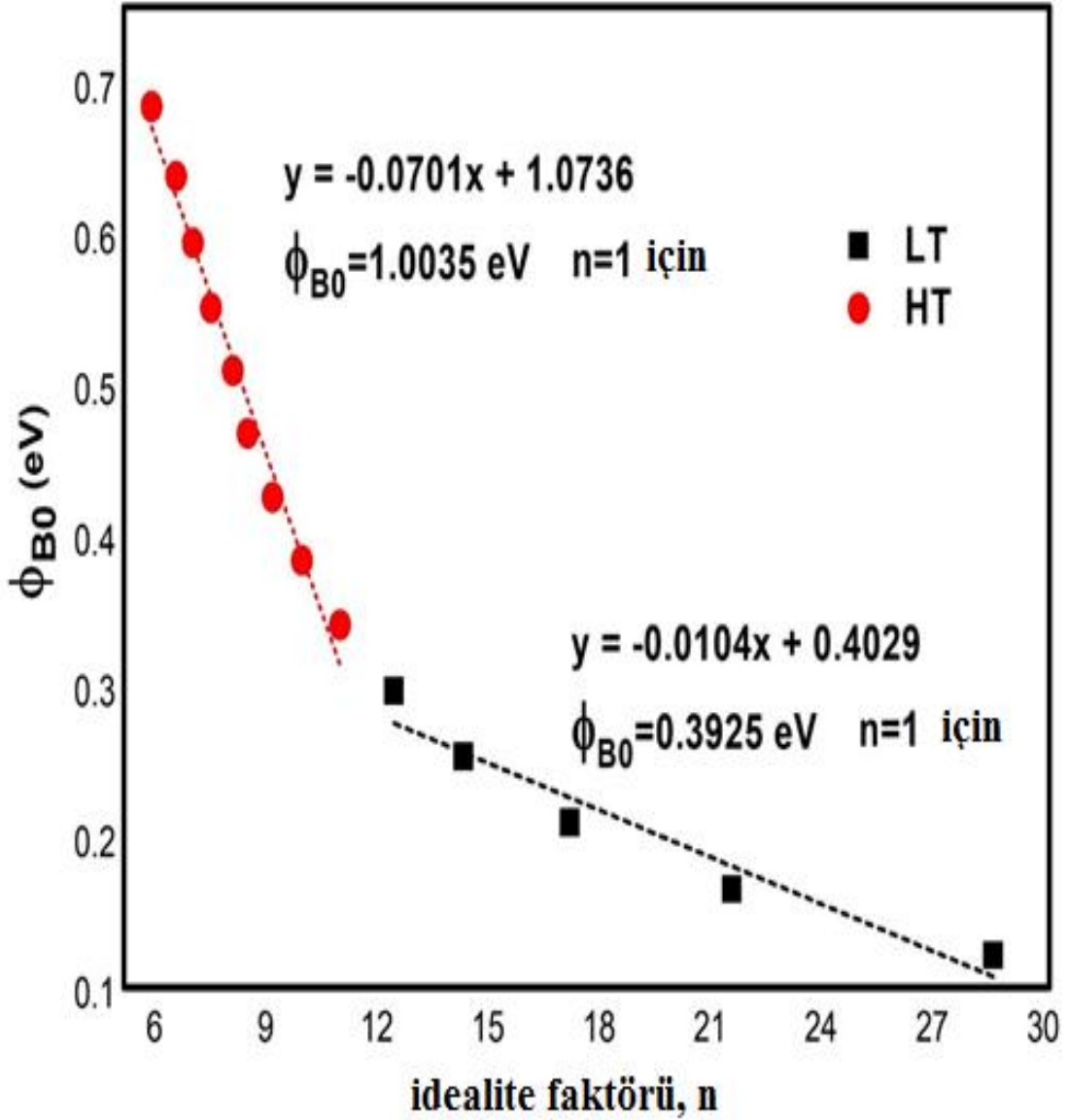
olabilir. Teorik olarak tünelleme parametresi denklem (2.5) de verilmişti (Crowell ve Rideout 1969, Huang ve Wang 2015).

Tünelleme mekanizmasının baskın olup olmadığı belirlenerek tünelleme parametresi (E_{00}) termal enerji ile karşılaştırılabilir. E_{00} , kT/q 'dan çok daha küçükse, TE teorisi baskındır. E_{00} , kT/q 'dan büyükse, FE teorisi baskındır. E_{00} değeri kT/q 'ya yakın ise TFE teorisi baskındır. E_{00} , denklem (2.5) 'den 1.05 meV olarak hesaplanır. Bu teorik tünelleme parametresi değeri, 60 K' da bile kT/q dan çok daha düşüktür. Ayrıca, Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, E_{00} değeri, $n_{\text{tun}} - T$ grafiği fit edilerek değişik değerler alınıp deneysel değerine uydurularak ~160 meV bulunmuştur.



Şekil 4.5 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun $n_{\text{tun}} - T$ grafiği

Metal ile yarıiletken arasındaki bariyer yüksekliği ile idealite faktörü arasında doğrusal bir ilişkinin varlığı 1997 yılında keşfedildi (Tung 1991, Schmitsdrof 1997). Şekil 4.6’da bu ilişkinin grafiği Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotu için görülmektedir.



Şekil 4.6 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotunun Φ_{B0} - n grafiği

Φ_{B0} - n grafiği Şekil 4.6’da görüldüğü gibi farklı eğime sahip iki doğrudan oluşmaktadır. Bu iki doğru yüksek (160- 320K) ve düşük sıcaklık (60 K – 140 K) bölgelerini göstermektedir. Grafikteki düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerindeki iki doğru ayrı ayrı fit edilerek 60 K – 140 K aralığı için $\Phi_{B01} = -0.0104n + 0.4029$ denklemi ve 160

K – 320 K bölgesinde için $\Phi_{B02} = -0.0701n + 1.0736$ denklemi elde edilmiştir. Bu denklemlerde $n=1$ alınarak düşük sıcaklık bölgesi için $\Phi_{B01} = 0.3925$ eV ve yüksek sıcaklık bölgesi için $\Phi_{B02} = 1.0035$ eV olarak bulunmuştur. Metal ile yarıiletken arasındaki bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla doğru, idealite faktörünün ise ters orantılı davranış sergilemesi, bariyerin homojen olmadığına kanıttır (Tung 1991, Schmitsdrof 1997). Bariyer homojensizliği denklem (4.6) daki gibi ifade edilir (Gümüş vd. 2015)

$$P(\Phi_{B0}) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\Phi_B - \bar{\Phi}_{B0})^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (4.6)$$

Burada $\bar{\Phi}_{B0}$ ortalama bariyer yüksekliği, σ_s standart sapma ve eksponansiyel teriminin önündeki ifade ise normalizasyon sabitidir. Bariyerin homojen olmadığı yapılarda bariyerdeki akım denklem (4.7)'de verilmiştir;

$$I(V) = AA^*T^2 \exp \left[-\frac{q}{kT} \left(\bar{\Phi}_{ap} - \frac{q\sigma_0^2}{2kT} \right) \right] \exp \left(\frac{-qV}{n_{ap}kT} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{q(V - IR_s)}{kT} \right) \right] \quad (4.7)$$

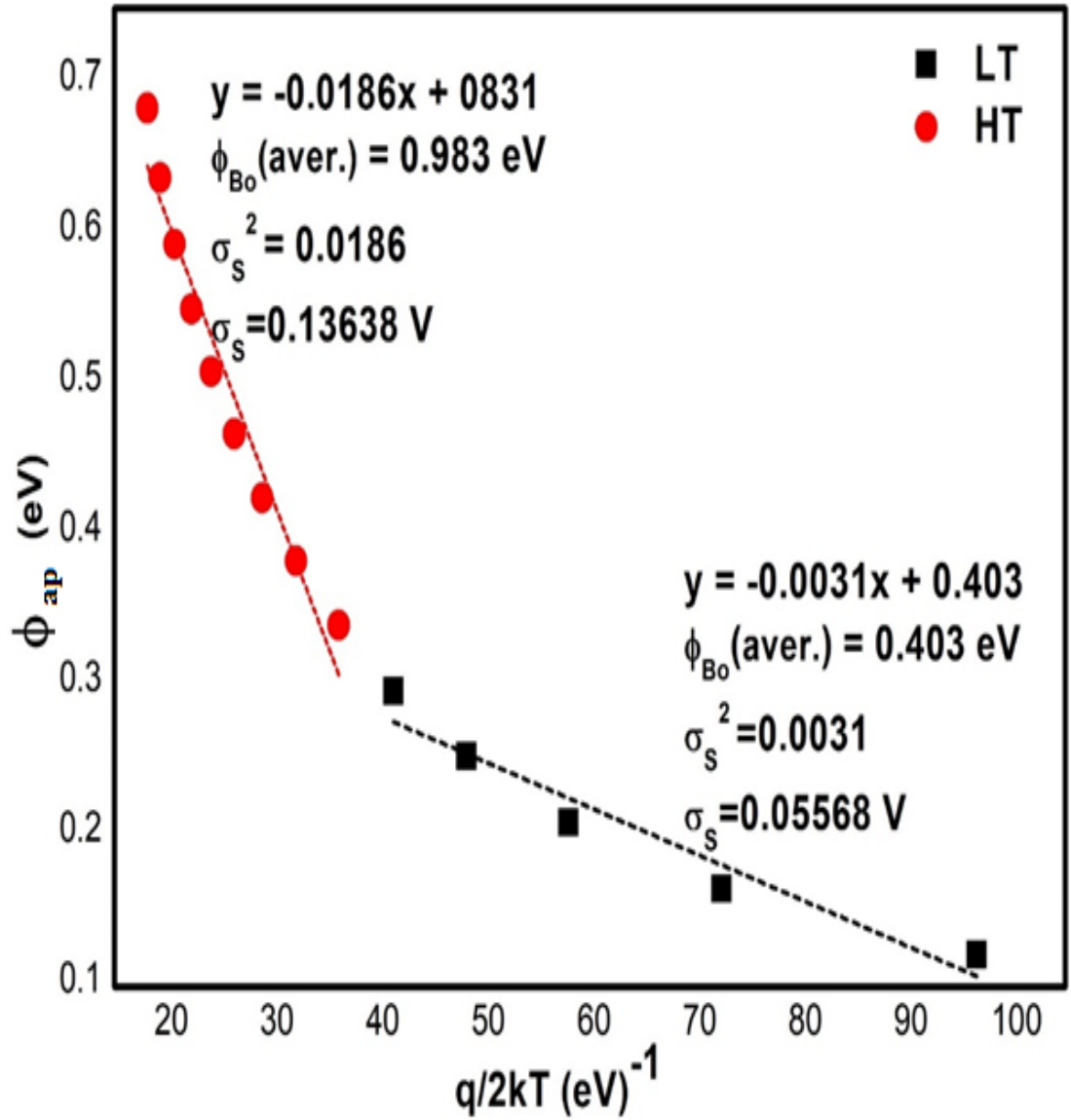
Burada Φ_{ap} görünür bariyer yüksekliği ve n_{ap} görünür idealite faktörü sırasıyla denklem (4.8) ve denklem (4.9)'de verilmiştir (Tung 1991, Werner ve Güttler 1991, Chand ve Kumar 1996, Schmitsdrof 1997, Shash vd. 2013).

$$\Phi_{ap}(T) = \bar{\Phi}_{B0} - \frac{q\sigma_{s0}^2}{2kT} \quad (4.8)$$

Bu denklemde $\bar{\Phi}_{B0}$ ve σ_{s0} gerilimin sıfır olduğu durumdaki bariyer yüksekliğini ve standart sapmayı gösterir.

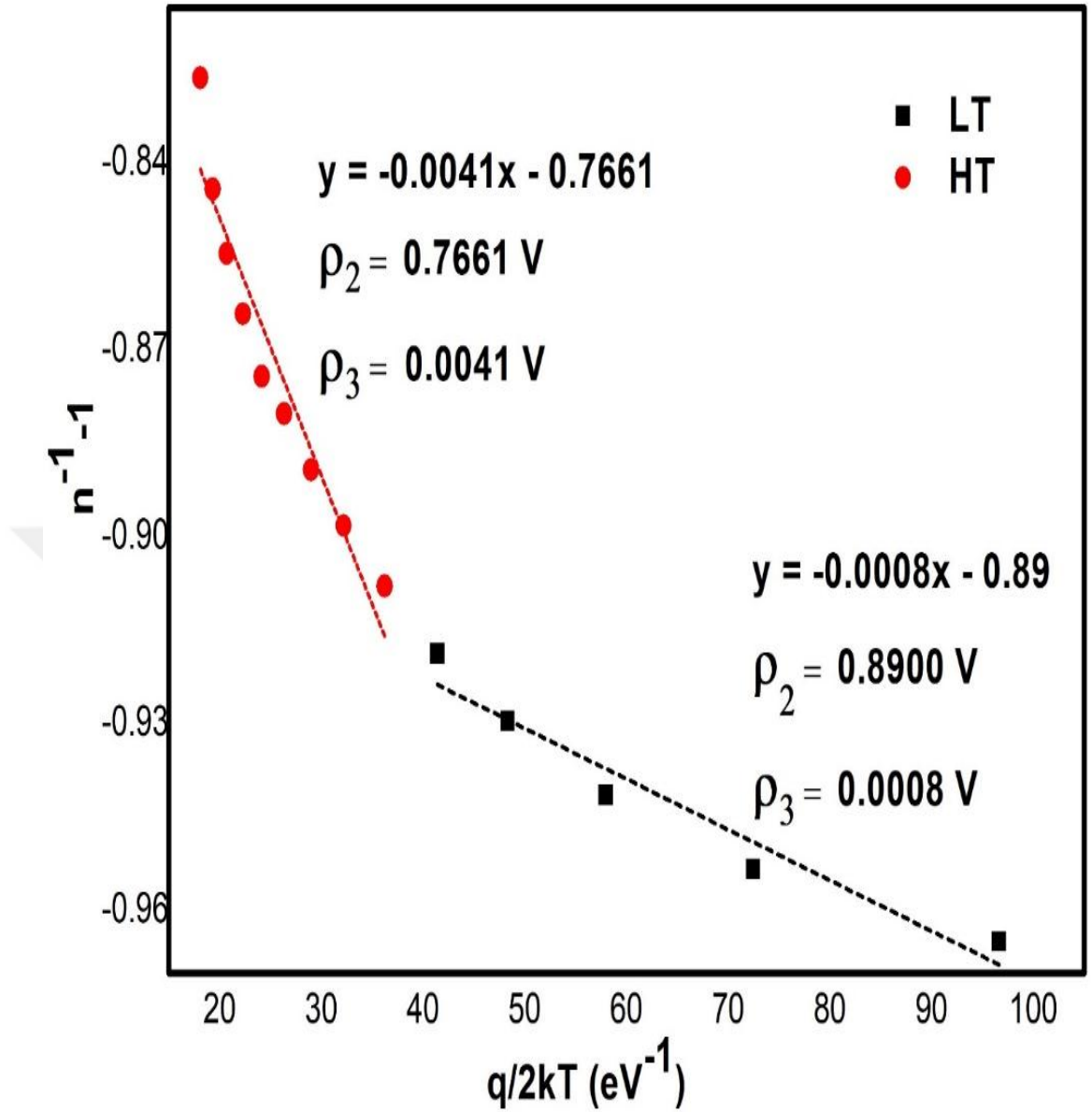
$$\frac{1}{n_{ap}(T)} - 1 = \rho_2 - \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (4.9)$$

Bu denklemde ρ_2 ve ρ_3 gerilim katsayılarıdır ve sıcaklığa göre farklılık gösterirler (Werner ve Güttler 1991). Yapının $\Phi_{ap} - q/2kT$ değişimi Şekil 4.7'de ve $n^{-1} - 1 - q/2kT$ değişimi de Şekil 4.8'de çizilmiştir.



Şekil 4.7 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlarda 60 -320 K aralığında $\Phi_{ap} - q/2kT$

Şekil 4.7'deki $\Phi_{ap}-q/2kT$ grafiği farklı eğime sahip iki doğrudan oluşmuştur. Bu doğrular fit edildiklerinde düşük sıcaklık bölgesinde $\Phi_{B0} = 0.403$ eV ve $\sigma_{s0} = 0.056$ V olarak, yüksek sıcaklık bölgesinde ise $\Phi_{B0} = 0.983$ eV ve $\sigma_{s0} = 0.136$ V olarak elde edilmiştir. İki farklı lineer bölgede de elde edilen ve $\overline{\Phi_{B0}}$ 'dan küçük olan σ_{s0} değerleri bariyerin çevresinde oluşmuş engellik ya da patika dediğimiz yapılara ve bu yapıların küçük olduğuna işaret eder. Çizelge (4.1)'de görüldüğü gibi Şekil 4.1'den elde ettiğimiz Φ_{B0} değerleri Şekil 4.7'den ve denklem (4.13)'den elde ettiğimiz $\overline{\Phi_{B0}}$ 'dan daha küçük çıkmıştır.



Şekil 4.8 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlarda 60 -320 K aralığında $n^{-1}-1 - q/2kT$

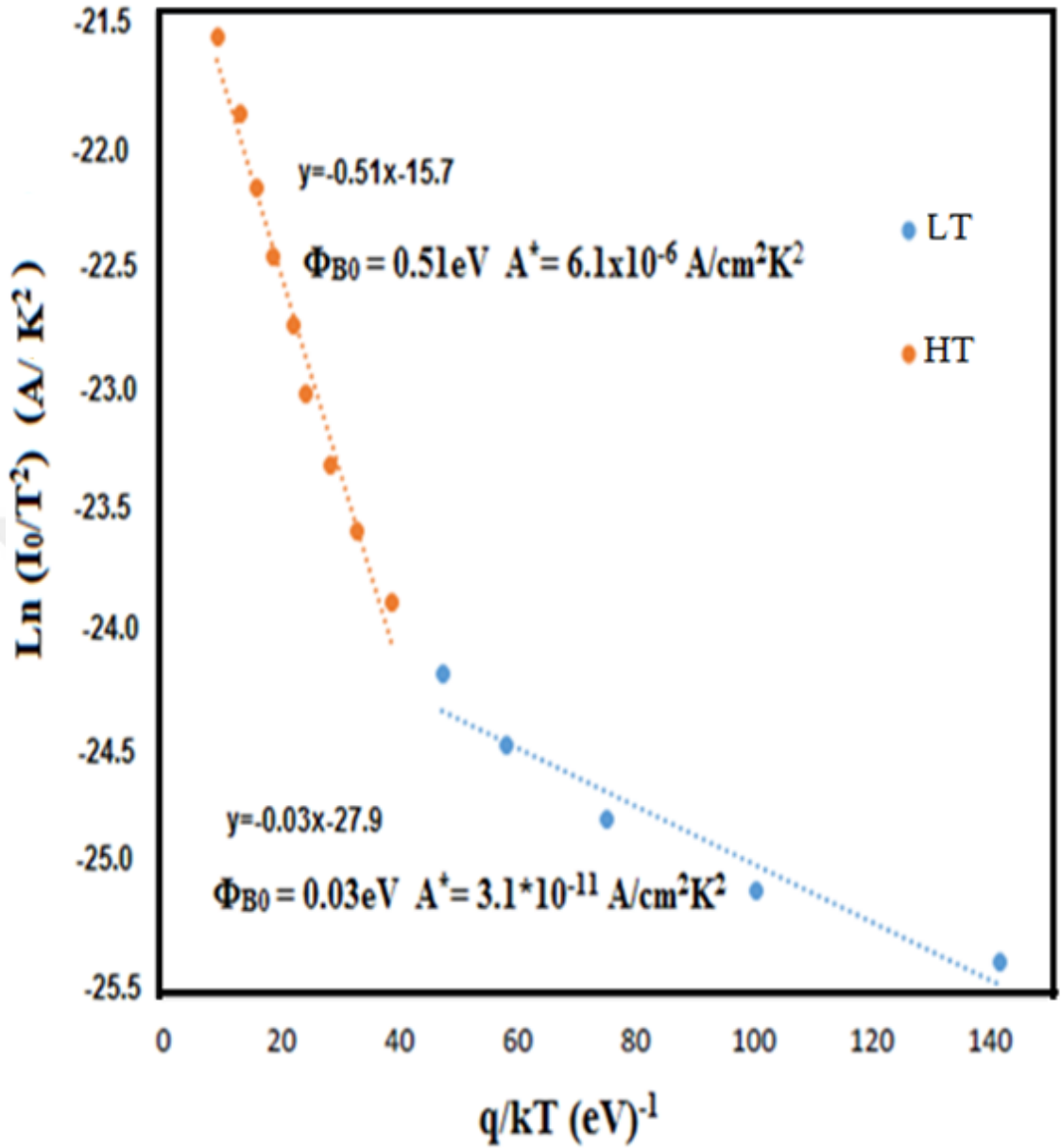
Şekil 4.8'deki $n^{-1}-1 - q/2kT$ grafiğinde de farklı eğimli iki doğru görülmektedir. Bu doğruların fit edilmelerinden düşük sıcaklık bölgesinde $\rho_2 = 0.8900 \text{ V}$ ve $\rho_3 = 0.0008 \text{ V}$ olarak elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık bölgesinde ise ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla 0.7661 V ve 0.0041 V olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de grafiklerin iki farklı eğimli doğrusal bölge gösterdiği bu davranış metal-yarıiletken arayüzeyindeki bariyer yüksekliğinin Double Gaussian Distribution (çift Gaussian dağılım) (DGD) gösterdiğinin kanıtıdır. Geçmişte yapılan

çalışmalarla elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür (Crowell 1977, Chand ve Kumar 1996, Horvarth 1996, Soylu ve Yakuphanoglu 2010, Tecimer vd. 2013). Al/ZnS-PVA/p-Si diyotlarının akım–gerilim ölçümlerinin sıcaklık değiştirilerek yapılan analizinden yapıda çift Gaussian dağılım teorisinin etkili olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, sıcaklığın daha düşük olduğu bölgelerde n' nin ideal durum olan 1' den çok daha büyük olarak bulunmasını DGD mekanizmasıyla izah edebiliriz. Gaussian dağılım metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşan bariyerin yapısına, büyütülen arayüzey katmanının homojensizliklerine, ayrıca bir de yarıiletken kısım ile arayüzey katmanının arasında bulunan yapı dislokasyonlarına bağlıdır (Chand ve Kumar 1996, Shash vd. 2013). MS-MPS tipi yapılarda bariyer yüksekliğini bulmak için denklem 4.10 daki Richardson denkleminde yararlanılabilir.

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\Phi_B}{kT} \quad (4.10)$$

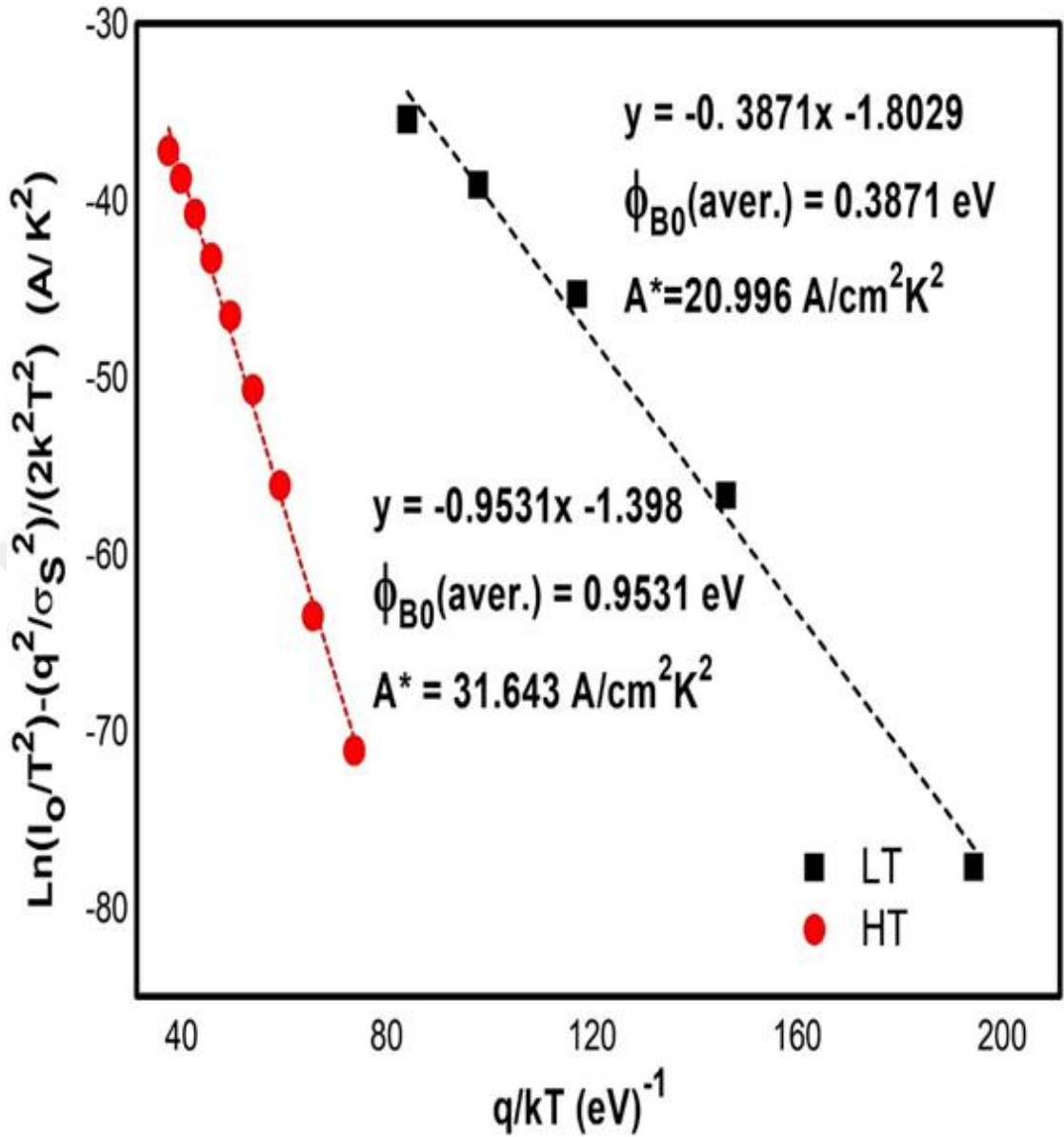
Şekil 4.9'da $\ln(I_0/T^2)$ - q/kT grafiği gösterilmiştir. Bu grafikte farklı eğimli iki bölgeye, düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerine sahiptir. Bu da yine bize hazırladığımız Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky bariyer diyotlarımızda iki farklı akım iletim mekanizmasının var olduğuna işaret etmektedir (Saxena 1969, Ejderha vd. 2009, Soylu ve Yakuphanoglu 2010, Marıl 2015). Klasik Richardson eğrisi dediğimiz bu grafiğin yüksek ve düşük sıcaklık bölgeleri için yazılan fit denkleminde elde edilen A^* değeri, teorik değerinden çok farklıdır. Bu sapmaların sebebinin engeldeki homojensizliklerin olabileceği düşünülmüştür (Hackam ve Harrop 1972, Rajagopal vd. 2012, Kaya vd. 2016).



Şekil 4.9 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda $\ln(I_0/T^2)$ - q/kT grafiği

Bu değişik iki bölgeyi açıklayabilmek için denklem (4.10)'u bariyerin her yerde homojen olmadığını dikkate alarak denklem (4.11)'deki gibi ifade edebiliriz (Hackam ve Harrop 1972, Chand ve Kumar 1996).

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{q\sigma_s}{kT}\right)^2 = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{B0}}{kT} \quad (4.11)$$



Şekil 4.10 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotun modifiye Richardson grafiği

$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{q\sigma_s}{kT}\right)^2 - q/kT$ modifiye Richardson grafiği Şekil 4.10'da görülmektedir. Grafik çizilirken Şekil 4.7'de bulunan σ_s değerleri ve çizelge 4.1'deki I_0 değerleri kullanılmıştır. Grafikte, yüksek ve düşük sıcaklıklarda olmak üzere iki farklı eğri elde edilmiştir. Şekil 4.10'daki her iki eğri ayrı ayrı fit edilerek bariyer yüksekliği ve Richardson sabiti değerleri bulunmuştur. Φ_{B0} ve A^* değeri düşük sıcaklık bölgesinde sırasıyla 0.3871 eV, 20.996 A/cm²K², yüksek sıcaklık bölgesinde ise 0.9531 eV, 31.643 A/cm²K² olarak bulunmuştur. Yüksek sıcaklık bölgesinde 31.643 A/cm²K² olarak

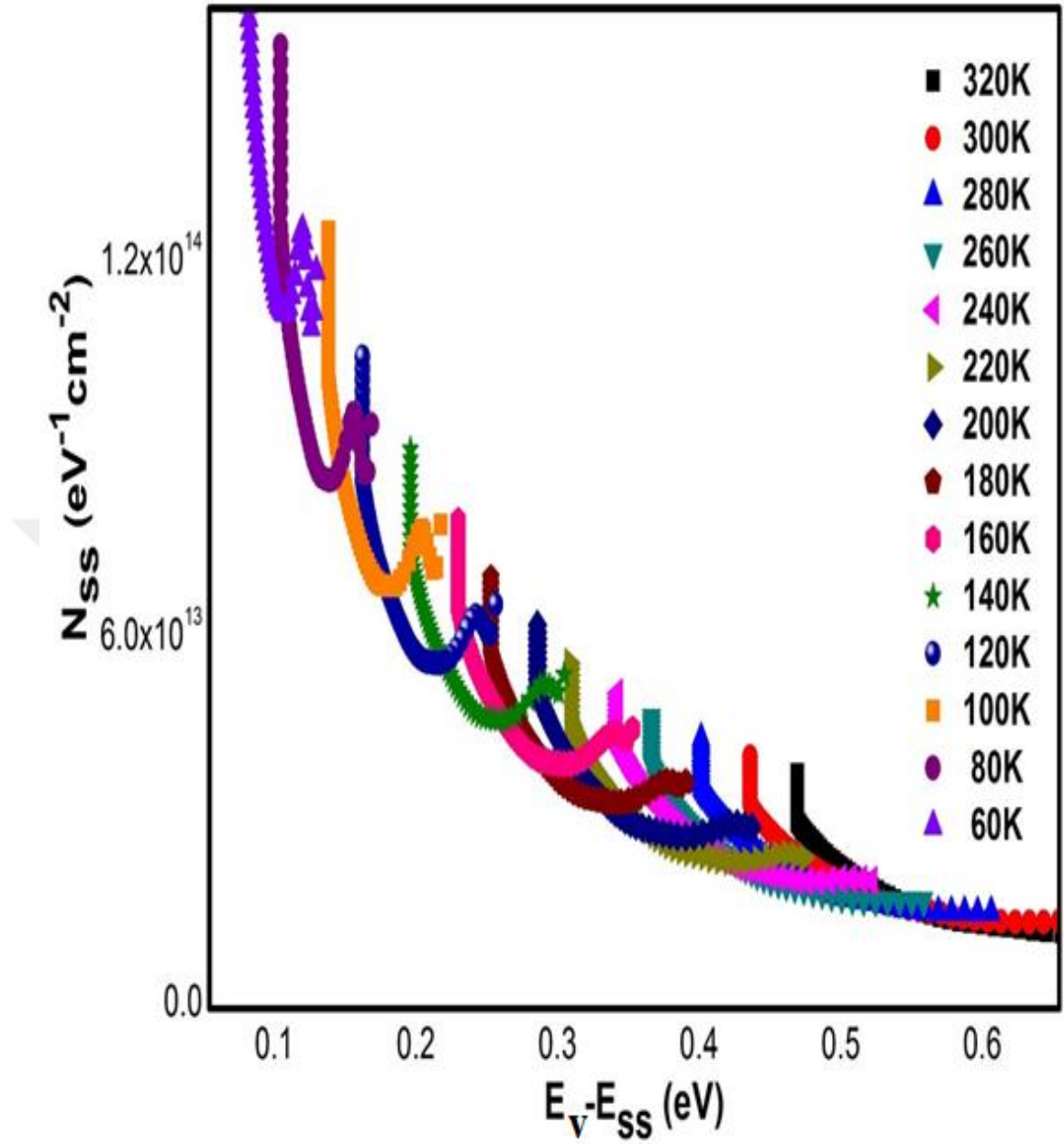
bulunan Richardson sabitinin, p -tipi Silisyumun $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ olan kuramsal değerine çok yakındır. Φ_{B0} ' ın değeri ise düşük sıcaklık bölgesinden daha düşük, yüksek sıcaklık bölgesinde daha büyük elde edilmiştir.

İdealite faktörünün $n>1$ olarak bulunması yapıların ideal durumdan ıraksadığının kanıtıdır. Bu ise arayüzey durumlarının bir sonucudur. Denklem (2.17), idealite faktörünü yalıtkan tabaka kalınlığına ve yarı iletkenle dengede olan arayüzey durumları için arayüzey durum yoğunluğuna bağlayan ifadeyi verir. Denklem (2.15) yardımıyla belirlenen gerilime bağlı idealite faktörü değerlerine göre arayüzey durumlarının yoğunluk değerleri 2.17 denkleminde elde edilmiştir. (2.18) denklemi kullanılarak $E_{ss}-E_v$ hesaplandıktan sonra, Al/ZnS-PVA/p-Si yapısının $N_{ss} - (E_v-E_{ss})$ grafiği Şekil 4.11 de verilmiştir.

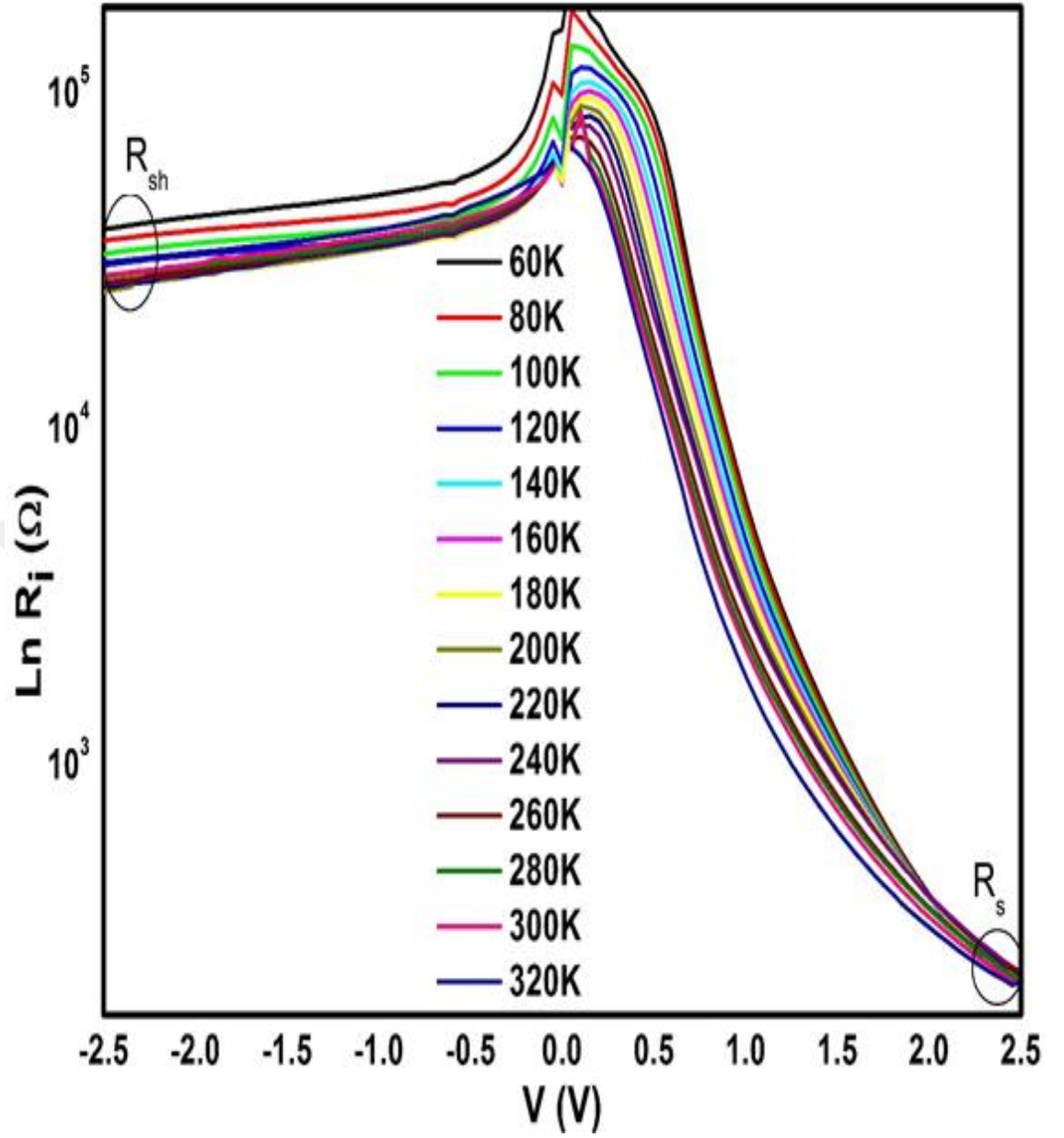
Al/ZnS-PVA/p-Si yapısının $N_{ss} - (E_v-E_{ss})$ grafikleri Şekil 4.11'de çizilmiştir. N_{ss} değerleri hesaplandığında $\sim 10^{13} - 10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değişmekte ve sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu durum, elektrik alan ve sıcaklık etkileri varlığında yüzey durumlarındaki yüklerin tekrardan yapılandırılması ve tekrardan düzenlenmesini göstermektedir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi N_{ss} değerleri tüm sıcaklıklar için E_g 'nin ortasından valans bandının (E_v) alt seviyesine doğru artmaktadır. N_{ss} 'nin değerinin sıcaklık arttıkça azalması, yeterli termal enerji kazanarak tuzaklardan kaçan birçok yüklerin sonucudur.

Uygulamada M/S arayüzünde oluşan tabakanın varlığı, kalınlığı (d_i), arayüzey tabakanın dielektrik sabiti (ϵ_i) ve tüketme bölgesi genişliği (W_D), yarıiletken tabakanın dielektrik sabiti (ϵ_s) sebebiyle idealite faktörünün değeri ideal durumdan ($n=1$) sapmıştır. N_{ss} 'nin enerjiye bağlı dağılım profili denklem (4.12)'deki gibi verilir (Arbatti vd. 2007).

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{d_i} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \quad (4.12)$$



Şekil 4.11 Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda $N_{ss} - (E_v - E_{ss})$ grafiği

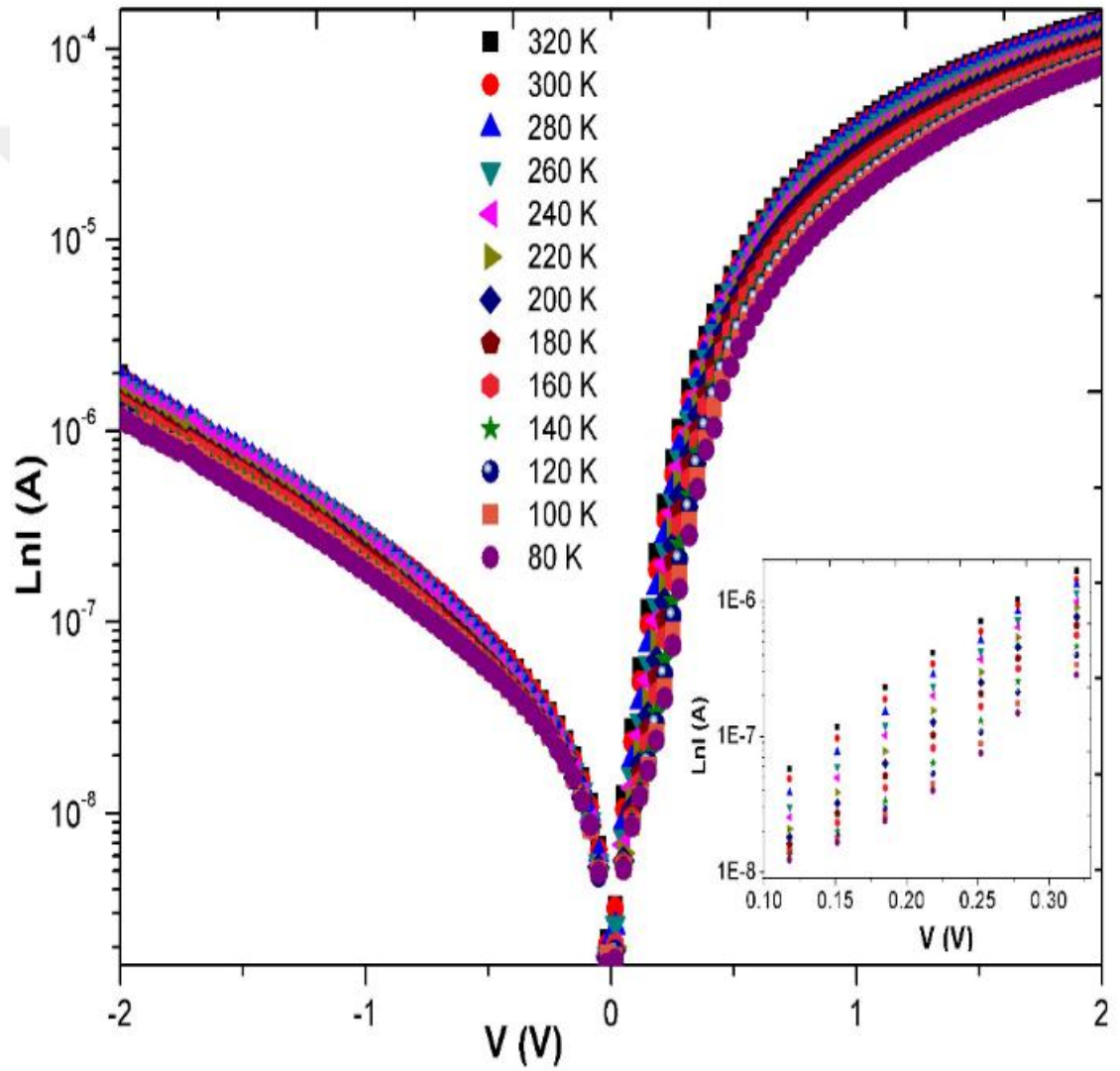


Şekil 4.12. Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlarda $\ln R_i - V$ değişimi

Diyotun direnci (R_i)'nin -2,5 V – 2,5 V aralığındaki gerilime bağlı değişimi şekil 4.12' de görülmektedir. Yüksek pozitif gerilimlerde R_i , R_s ye yaklaşırken, negatif gerilimlerde R_i , kısa devre direnci (R_{sh})'ye yaklaşmaktadır.

4.1.2 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) yapılar

Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) yapısının 80-320 K aralığında 20 K aralıklarla yapılan I-V ölçümleri Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Şekil 4.13’deki grafiklerin 0,075 < V < 0,35 gerilim aralığında lineer olduğu, 0,8 V’dan daha büyük gerilim bölgesinde ise organik arayüzey tabakası nedeniyle oluşan seri direnç etkisiyle lineerlikten ayrıldığı görülmektedir.



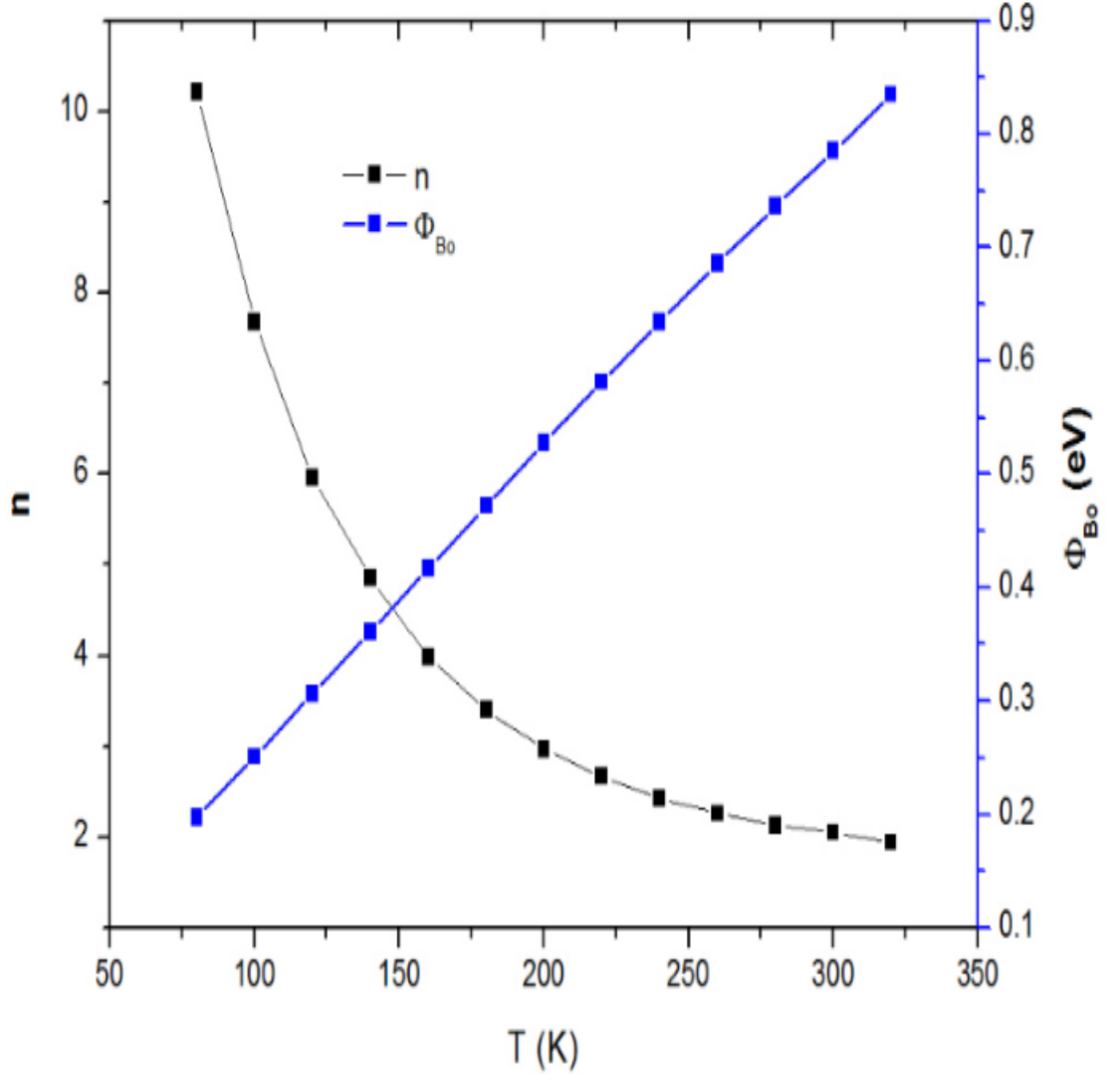
Şekil 4.13 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda LnI-V değişimi

Bu yapılar için de Al/ZnS-PVA/Al yapılarıdaki yol izlenerek grafiklerin lineer bölgesinden yararlanılarak I_0 doyma akımı, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri bulunmuş. Bu değerler sırasıyla 80 K sıcaklıkta 2.1×10^{-9} A, 9.846, 0.250 eV ve 320 K sıcaklıkta 7.7×10^{-9} A, 2.060, 0.828 eV olarak bulunmuştur (Çizelge 4.2). Düşük sıcaklıklarda bu kadar bu kadar yüksek n değerleri, daha düşük seviyedeki bariyerlerden akan elektronik yükler (elektronlar ve deşikler) ile açıklanabilir.

Çizelge 4.2 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotun 80-320 K sıcaklık aralığındaki akım-gerilim (I-V) belirtkenleri

T (K)	I_0 (A)	n	Φ_{B0} (eV)	nT (K)	R_s (Ω)	I_F/I_R
80	2.1×10^{-9}	9.846	0.250	788	3.01×10^4	69.45
100	2.0×10^{-9}	7.505	0.250	751	2.64×10^4	71.27
120	1.9×10^{-9}	5.886	0.305	706	2.56×10^4	71.28
140	1.9×10^{-9}	4.922	0.359	689	2.53×10^4	71.83
160	2.0×10^{-9}	4.212	0.413	674	2.37×10^4	72.81
180	1.9×10^{-9}	3.508	0.469	631	2.35×10^4	73.37
200	2.0×10^{-9}	3.055	0.524	611	2.34×10^4	77.93
220	2.3×10^{-9}	2.756	0.578	606	2.25×10^4	74.52
240	2.9×10^{-9}	2.552	0.629	612	2.05×10^4	73.37
260	3.5×10^{-9}	2.372	0.681	617	2.04×10^4	72.56
280	4.6×10^{-9}	2.248	0.730	629	1.99×10^4	71.70
300	6.2×10^{-9}	2.174	0.778	652	1.99×10^4	71.64
320	7.7×10^{-9}	2.060	0.828	659	1.99×10^4	71.16

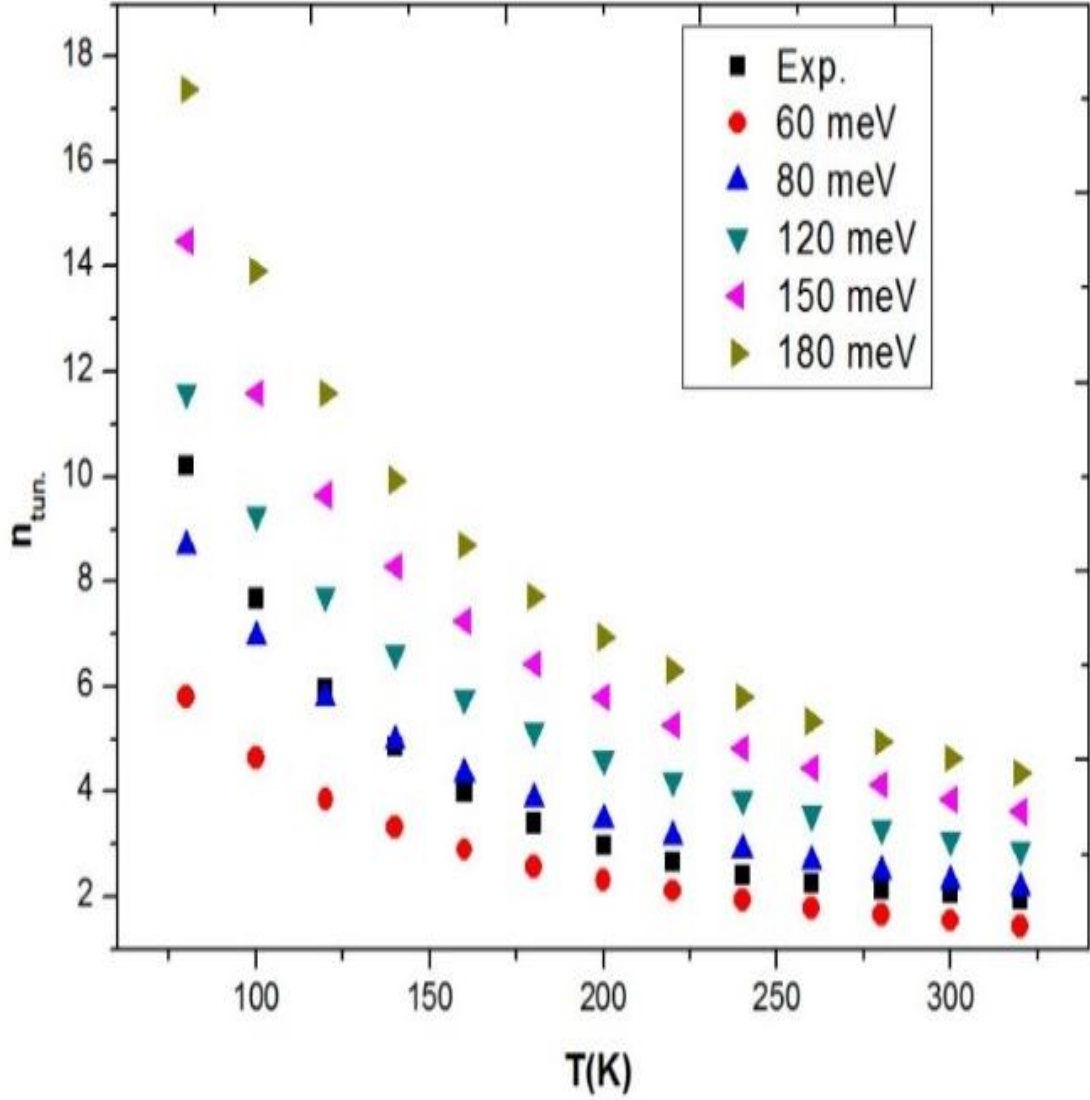
Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si yapısının sıcaklık azaldıkça n değeri artarken Φ_{B0} değeri azalmakta ve özellikle düşük sıcaklıklarda ($T \leq 200K$) hem n 'deki hem de Φ_{B0} 'daki bu değişimler daha belirgin hale geldiği çizelgede görülmektedir.



Şekil 4.14 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda n ve Φ_{B0} 'ın sıcaklığa göre değişimi

Tünelleme mekanizması, yarı iletkenin sadece daha düşük sıcaklık ve daha yüksek katkılama seviyesinde baskın olabilir. Teoride tünellemenin ölçüsü olan E_{00} parametresinin değeri denklem 2.5 den hesaplanmıştır. E_{00} 'ın değeri 1.05 meV

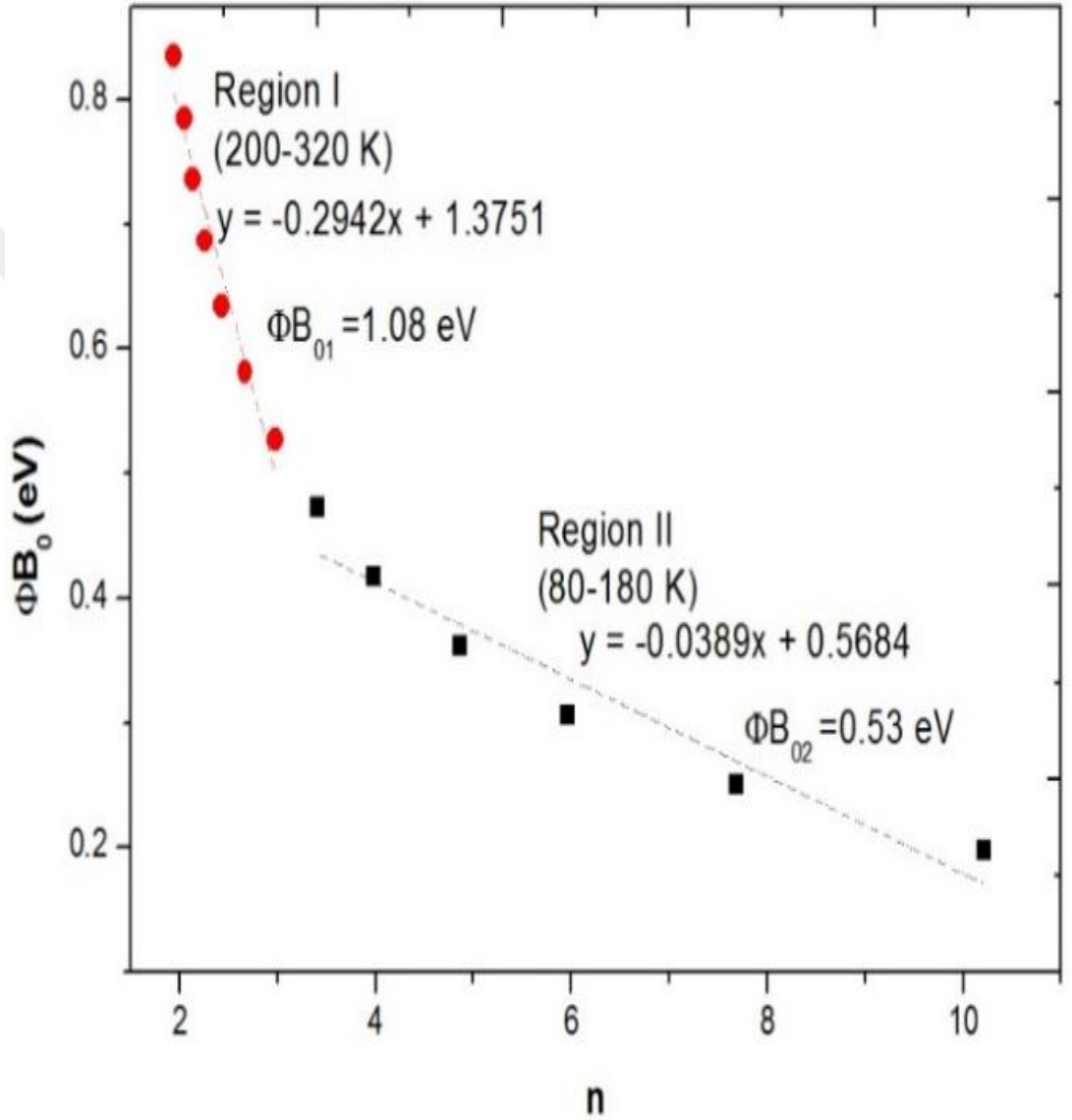
bulunmuştur. Şekil 4.15'de görüldüğü gibi (n_{tun} vs T), E_{oo} değeri, n_{tun} vs T 'nin deneysel değeri uydurularak 80 meV bulunmuştur.



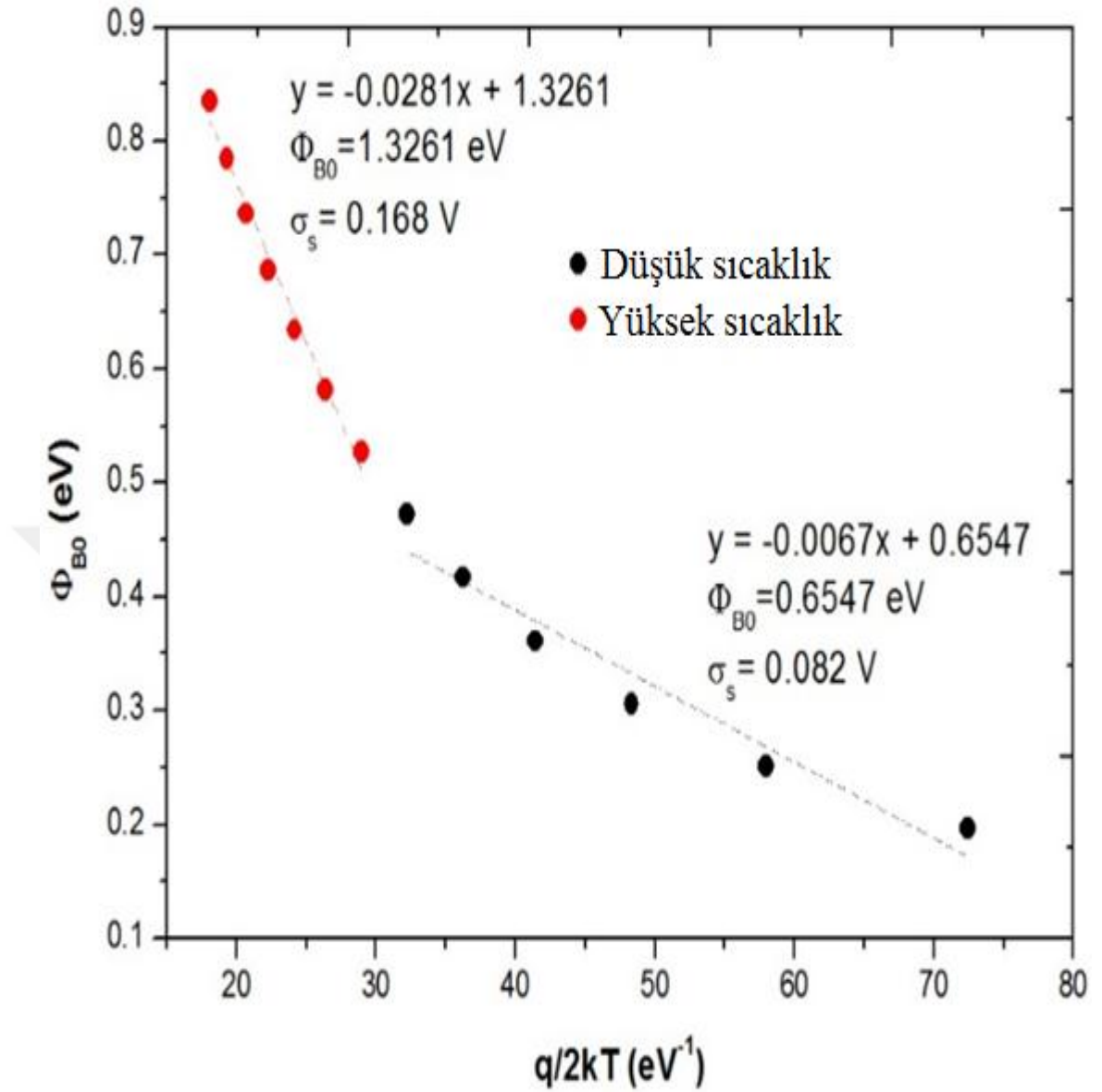
Şekil 4.15 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda n_{tun} - T grafiği

Sonuç olarak, sıcaklık artışı ile BH'de gözlemlenen artış ve n 'de azalma, BH'nin M/S arayüzünde uzaysal dağılım varlığı veya yüzey durumları yoluyla tünelleme ile ilişkilendirilebilir, çünkü düşük sıcaklıklarda bu tür daha yüksek idealite faktörü ve daha düşük Φ_{B0} değerleri sadece arayüzey polimer tabakası, N_{ss} ve daha yüksek doping konsantrasyonu değerleri ile açıklanamaz. Sıcaklık arttığından, birçok yük ortalama bariyer yüksekliğini aşmak için yeterli enerji kazanır ve görünen Φ_{B0} 'nin artmasına

neden olur. BH'nin GD'sinin varlığına dair bazı kanıtlar göstermek için, $\Phi_{B0} - n$ Şekil 4.16'da, $\Phi_{B0} - q/2kT$ grafiği şekil 4.17'de , $(n^{-1}-1) - q/2kT$ çizimi de 4.18'de görülebilir. Tüm grafikler, literatürde çift GD'li TE teorisinin değiştirilmiş bir versiyonuyla açıklanan, daha düşük ve yeterli yüksek sıcaklık aralığına uygun, farklı eğimlere sahip iki farklı lineer bölgeye sahiptir.

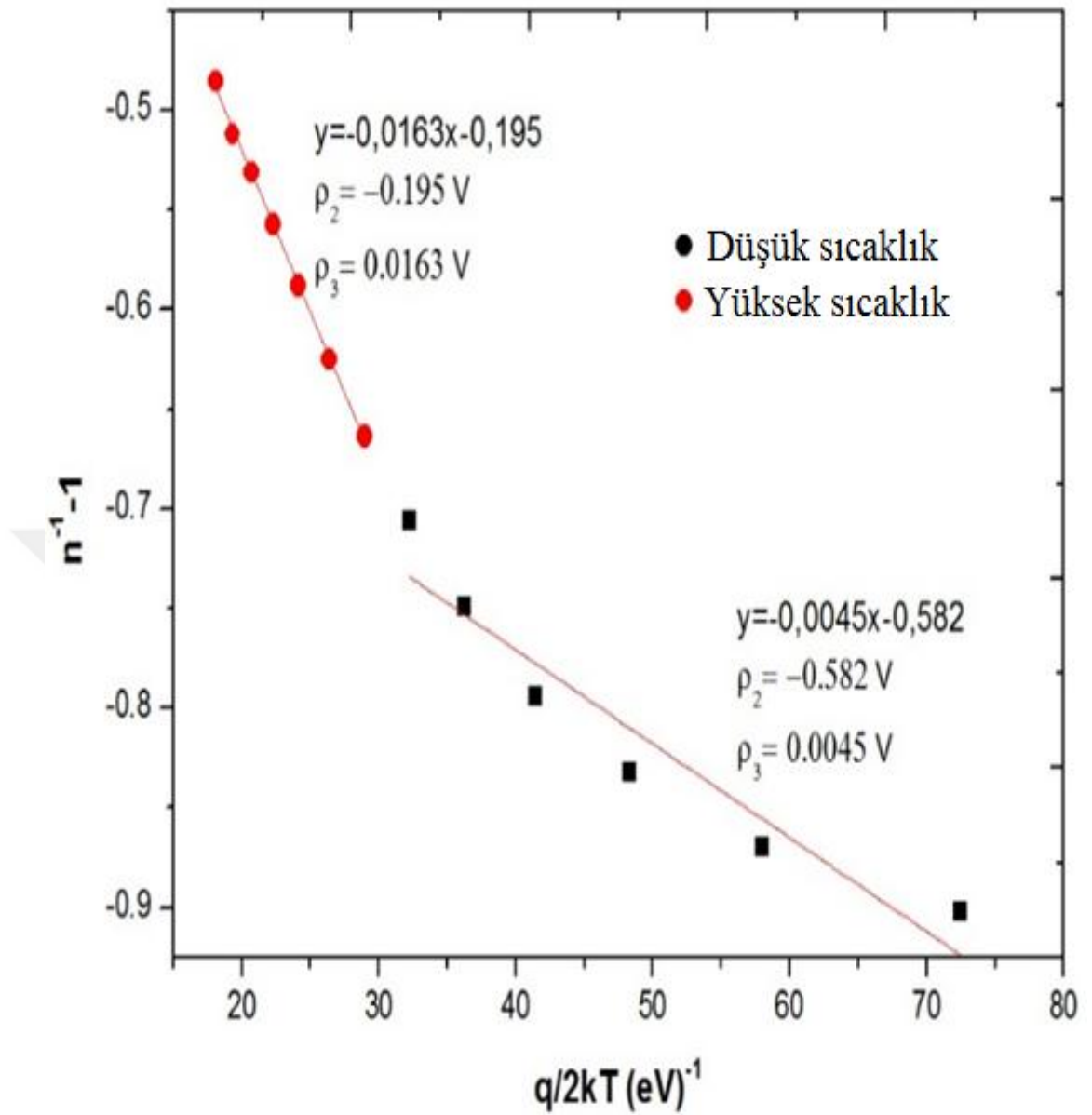


Şekil 4.16 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda $\Phi_{B0} - n$ değişimi



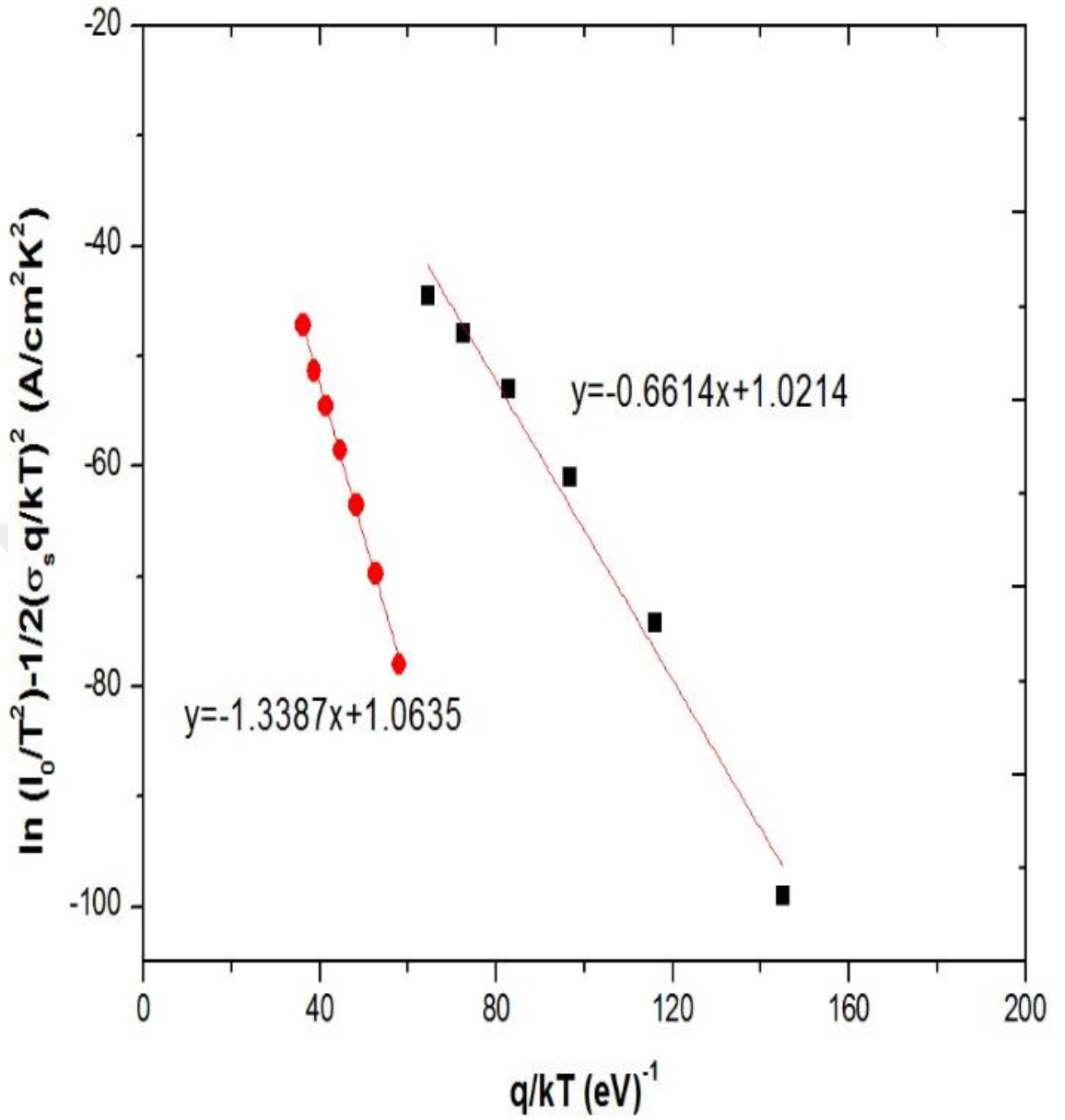
Şekil 4.17 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda Φ_{B0} - $q/2kT$ grafiği

Şekil 4.17 grafiğinden yararlanılarak ortalama bariyer yüksekliği $\overline{\Phi_{B0}}$ ve σ_s değerleri, yüksek sıcaklıklar için sırasıyla 1,326 eV ve 0,168 V, düşük sıcaklıklar için 0,655 eV ve 0,082 V olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, bariyer yüksekliğinin (ρ_2 ve ρ_3) gerilim deformasyon sabitleri, şekil 4.16'daki n^{-1} - $q/2kT$ grafiğinden yüksek sıcaklıklar için - 0,195 V ve 0,0163 V ve düşük sıcaklıklar için de sırasıyla -0,582 V ve sırasıyla 0,0045 V olarak bulunmuştur.



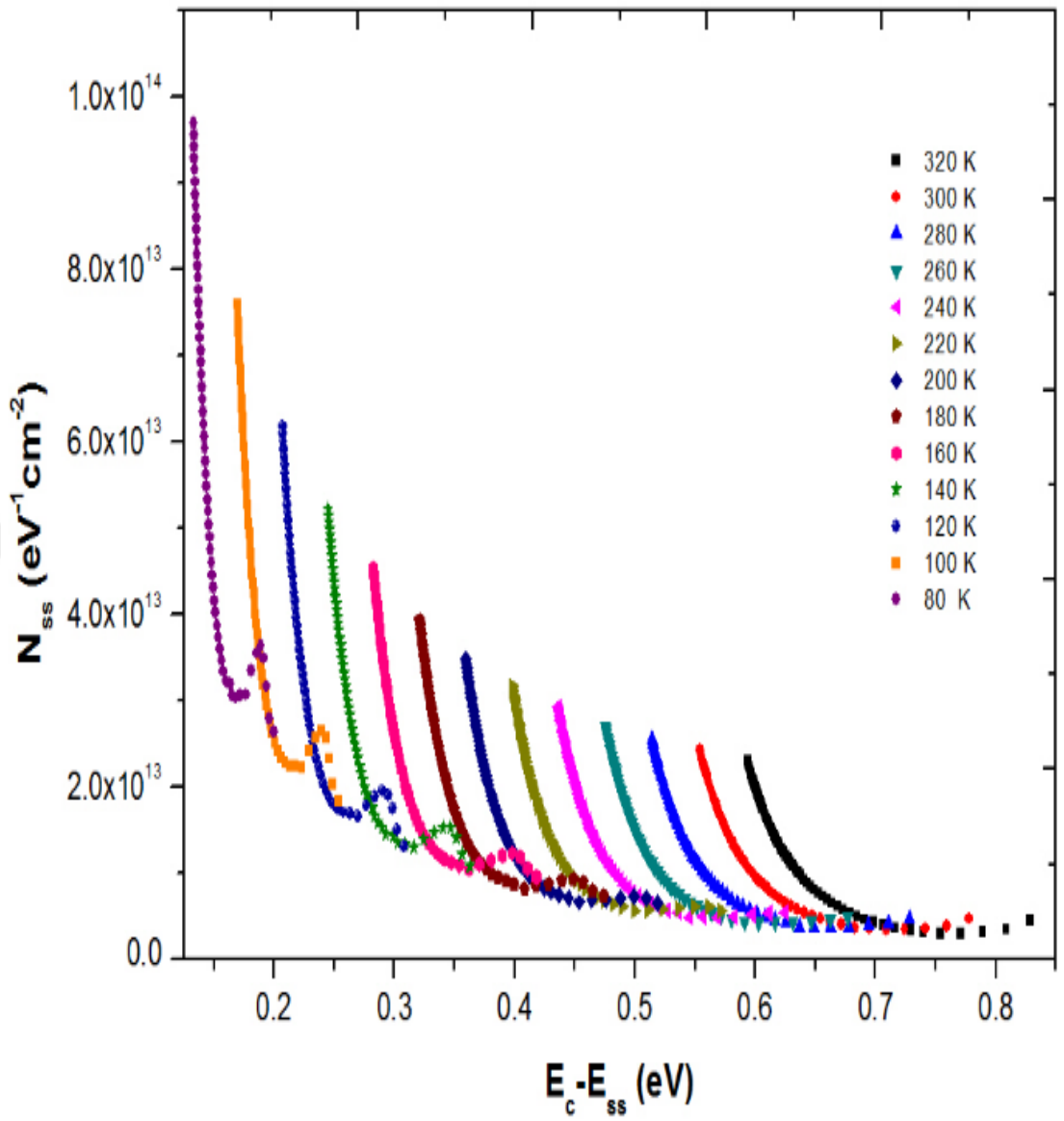
Şekil 4.18 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda ($n^{-1}-1$) - $q/2kT$ grafiği

Klasik Richardson eğrisi σ_s değeri kullanılarak denklem 4.16'daki gibi modifiye edilerek Şekil 4.19 grafiği çizilmiştir. Modifiye Richardson eğrisi görüldüğü gibi iki farklı eğimli bölgeye sahiptir. A^* ve Φ_{B0} , Şekil 4.19'daki grafikten düşük sıcaklıklar için sırasıyla $77,21 \text{ A/(cmK)}^2$ ve $1,0214 \text{ eV}$, daha yüksek sıcaklıklar için $115,86 \text{ A/(cmK)}^2$ ve $1,0635 \text{ eV}$ olarak türetilmiştir.



Şekil 4.19 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda modifiye Richardson değişimi

Özellikle yüksek sıcaklıklar için modifiye Richardson grafiğinden elde edilen A^* değerlerinin n-Si için teorik değerlerine (112 A/cmK²) çok yakın olduğu oldukça açıktır.

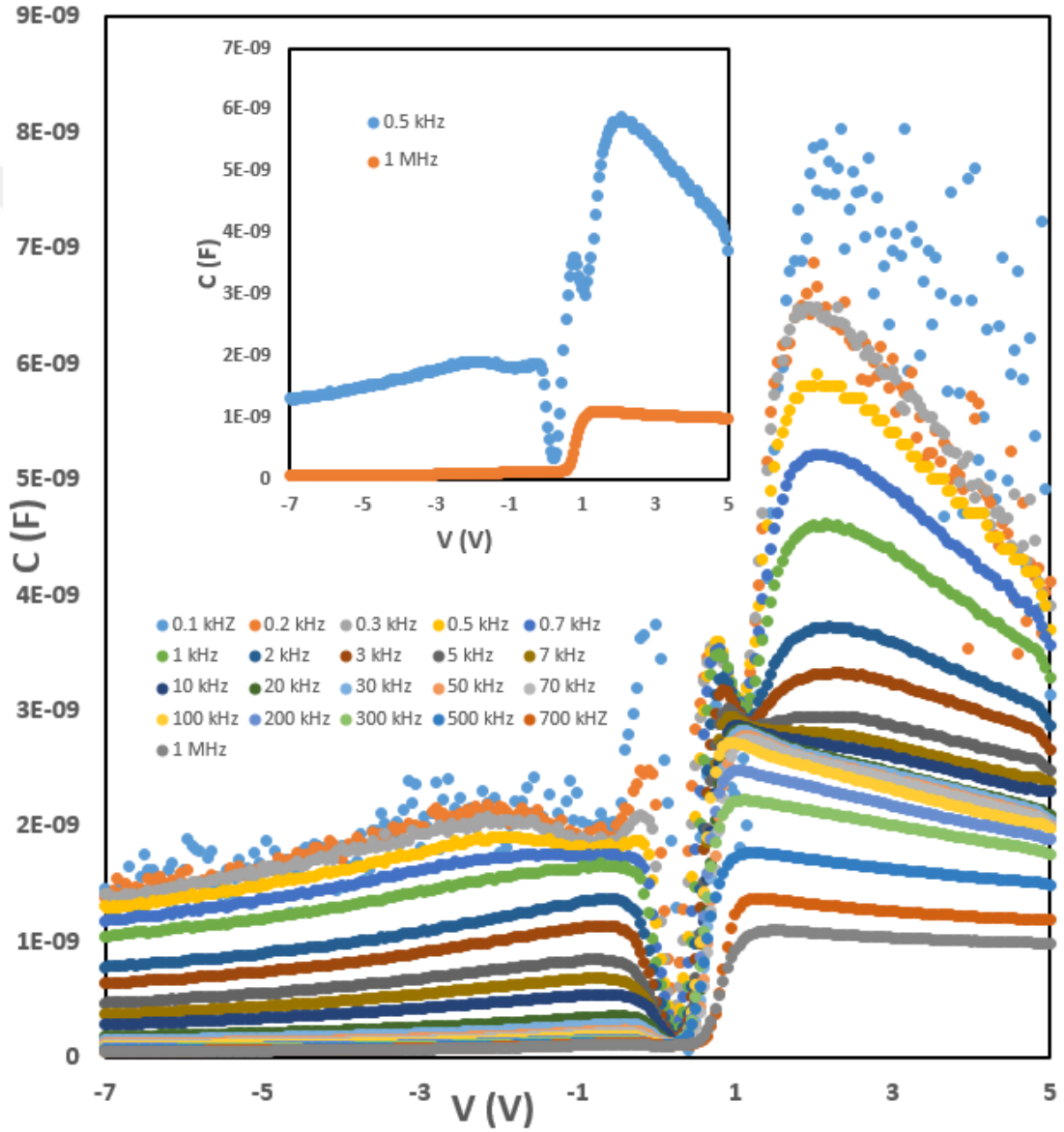


Şekil 4.20 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda N_{ss} vs $E_c - E_{ss}$ değişimi

N_{ss} değerleri $\sim 10^{13} - 10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasında değişmekte ve artan sıcaklıkla azalmaktadır (Şekil 4.20). N_{ss} 'nin sıcaklık artışıyla azalması, yeterli termal enerji kazanarak tuzaklardan kaçan birçok yükün sonucudur.

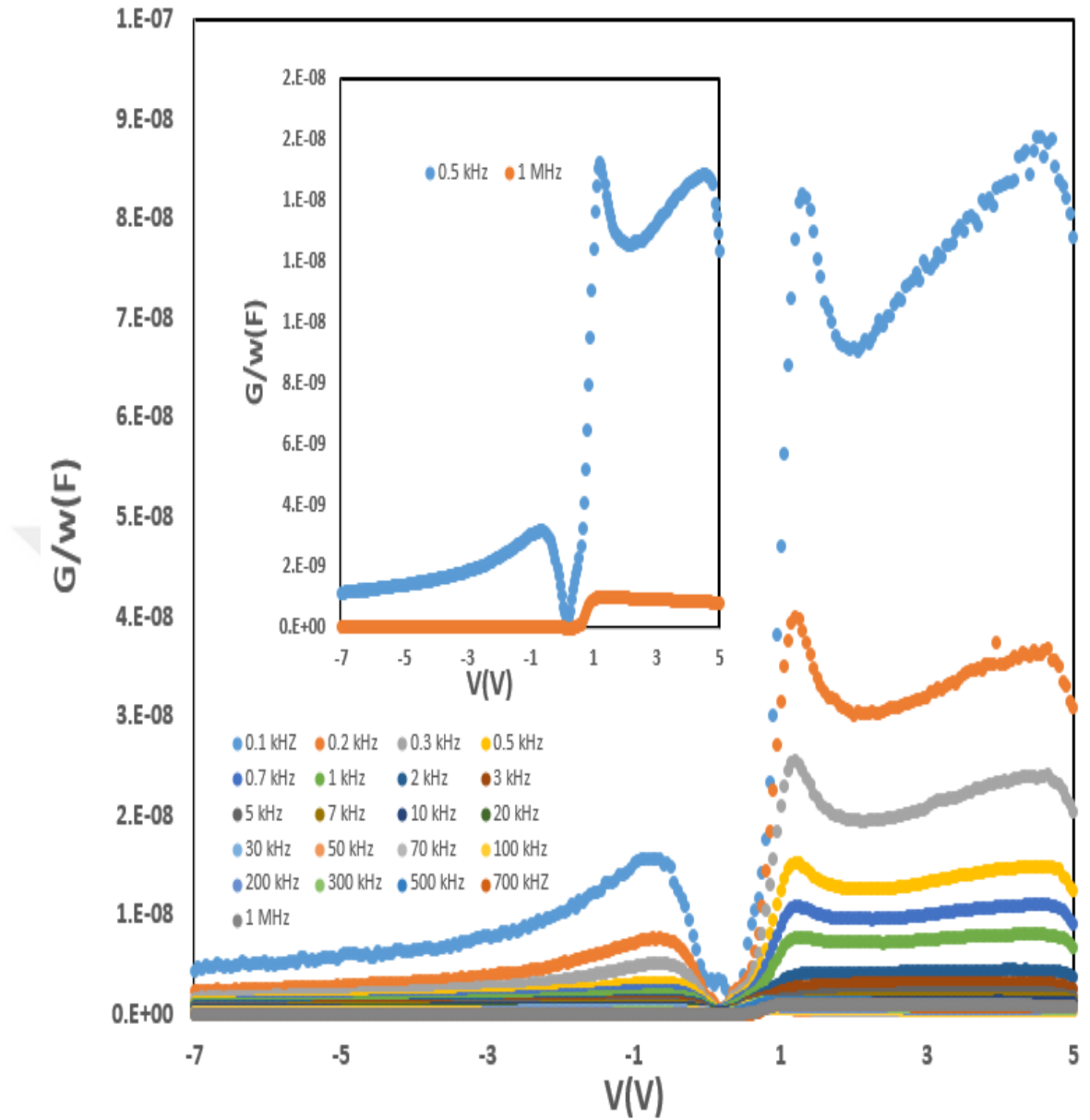
4.2 Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerin Frekansa Bağlı Olarak İncelenmesi

Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda 0,1 kHz – 1 MHz geniş frekans ve - 5 V – 7 V gerilim aralığında C-V (Şekil 4.21) ve G/ω-V (Şekil 4.22) ölçümleri oda sıcaklığında yapılarak M' ve M'', ε', tanδ, ε'' gibi elektriksel parametreler araştırılmıştır.



Şekil 4.21 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda C – F değişimi

Şekil 4.21'den yapının kapasitesinin gerilim -7 volttan 5 volta değişirken tersinim bölgesinden kuvvetli yığılma bölgesine değiştiği ve frekans artarken de kapasite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu arayüzey durumlarının (N_{ss}) frekansı takip edememesinden kaynaklanmaktadır (Schroder 1998). C-V eğrilerinin yığılma bölgesinde düşük frekans değerlerinde iki pik varken frekans değeri büyüdükçe piklerden biri yok olmaktadır. Bu durum tersinim bölgesinde de görülmektedir. Bunun sebebi polimer ve yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olabilir diye düşünülmektedir (Sze 1980, Taşcıoğlu vd. 2012). Arayüzey durumları frekansın daha küçük olduğu değerlerde ac sinyali takip edebilir ve böylece bir ek kondansatör oluşmuş gibi davranılır. Frekansın daha büyük olduğu değerlerdeyse $T=1/2\pi f$ formülüyle frekansa bağlılığı bulunan periyot parametresi arayüzey durumlarındaki taşıyıcıların ömründen küçük olacağından ac sinyali takip etme durumu olamaz ve dolayısıyla 2. pik oluşmaz (Sze 1980, Nicollian vd. 1982). G/ω -V grafiğinde düşük frekanslarda tüketim ve yığılma alanında pik oluşmuş, frekans değeri büyüdükçe bu pikin şiddeti de küçülmüştür (Şekil 4.22).

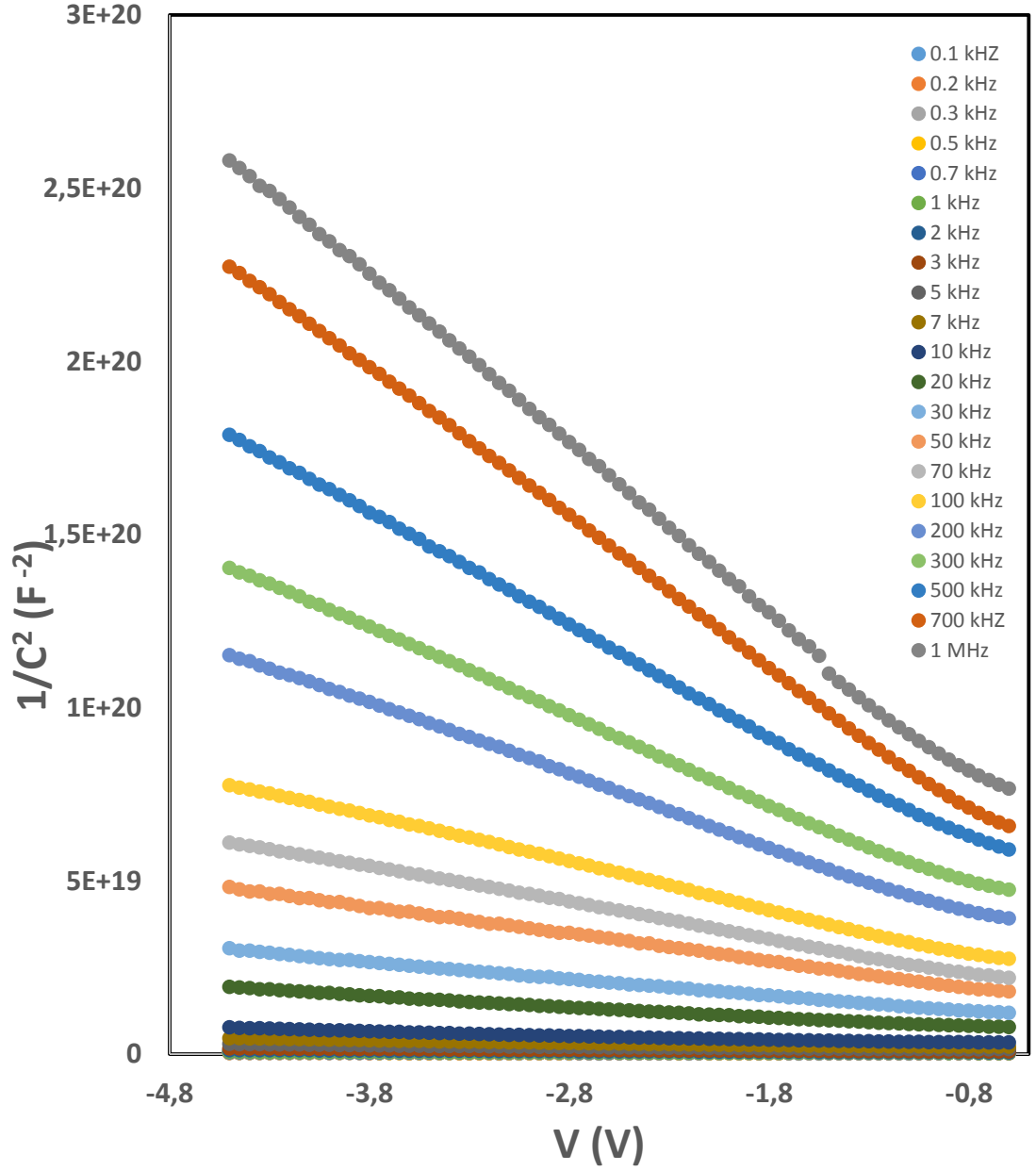


Şekil 4.22 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotun G/ω -V grafikleri

Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si yapısının C^{-2} -V grafikleri Şekil 4.23’de verilmiştir. Bu grafiklerden denklem 2.20 yardımıyla N_D katkı atom yoğunluğu, E_F Fermi enerji seviyesi ve V_D diffüzyon gerilimi gibi parametreler hesaplanabilir.

Şekil 4.23’deki C^{-2} -V grafiklerinin eğimlerinden N_D , gerilim eksenini kestiği noktalardan da V_0 değerleri elde edilmiştir. Bu değerler eşitlik 2.25, 2.28, 2.27 ve 2.21 kullanılarak E_F , W_D , Φ_B ve V_D hesaplanmıştır. Tüm bu parametreler hesaplanırken

arayüzey durumlarının yaptığı katkıları yok saymak için düşük frekanslardaki ölçümler göz ardı edilmelidir. Bulunan parametreler frekansa bağlı olarak Çizelge 4.3 de özetlenmiştir.



Şekil 4.23 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda $1/C^2$ - V değişimi

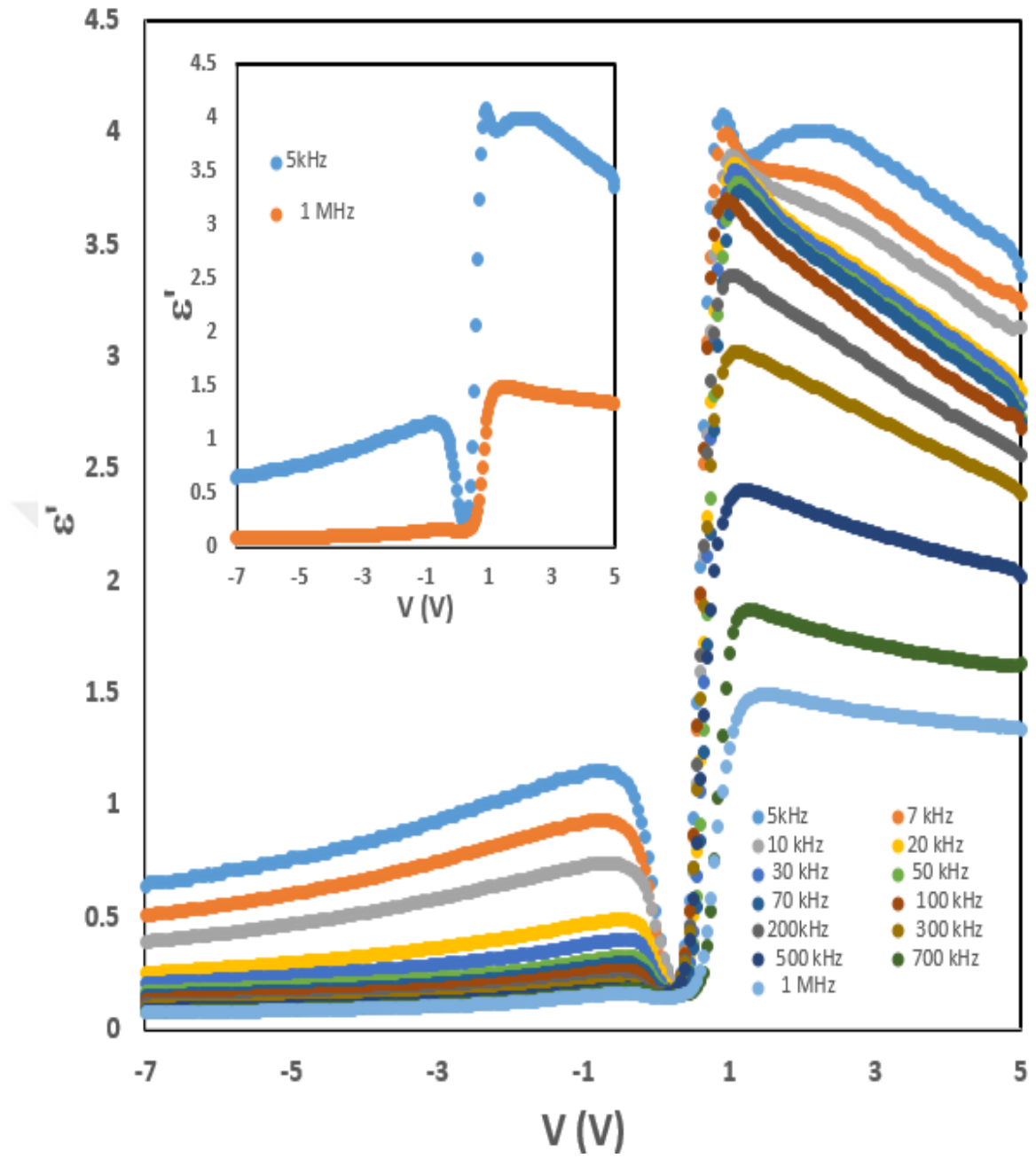
Çizelge 4.3 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda oda sıcaklığında bulunan elektriksel parametreler

f (Hz)	V_0 (eV)	N_D (cm) ⁻³	E_F (eV)	W_D (cm)	Φ_B (C-V) (eV)	R_s (-5V)
2.E+02	13.01	1.15E+18	0.92	1.14E-05	12.6	2.54E+04
3.E+02	12.43	1.04E+18	0.92	1.21E-05	12.0	2.51E+04
5.E+02	7.96	6.30E+17	0.93	1.25E-05	7.66	2.37E+04
7.E+02	5.91	4.30E+17	0.94	1.28E-05	5.68	2.18E+04
1.E+03	3.87	2.63E+17	0.95	1.34E-05	3.73	1.91E+04
2.E+03	2.35	1.19E+17	0.98	1.39E-05	2.31	1.35E+04
3.E+03	2.27	8.12E+16	0.99	1.61E-05	2.25	9.42E+01
5.E+03	2.29	4.63E+16	1.00	1.91E-05	2.24	8.88E+01
7.E+03	2.11	2.87E+16	1.01	2.54E-05	2.17	8.56E+01
1.E+04	1.94	1.68E+16	1.03	3.10E-05	2.03	7.97E+01
2.E+04	1.75	6.34E+15	2.10	3.88E-05	2.03	7.97E+01

Bu çalışmada kapasitans ve iletkenlik ölçüm sonuçlarından faydalanılarak oda sıcaklığında ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$ parametreleri hesaplanmıştır.

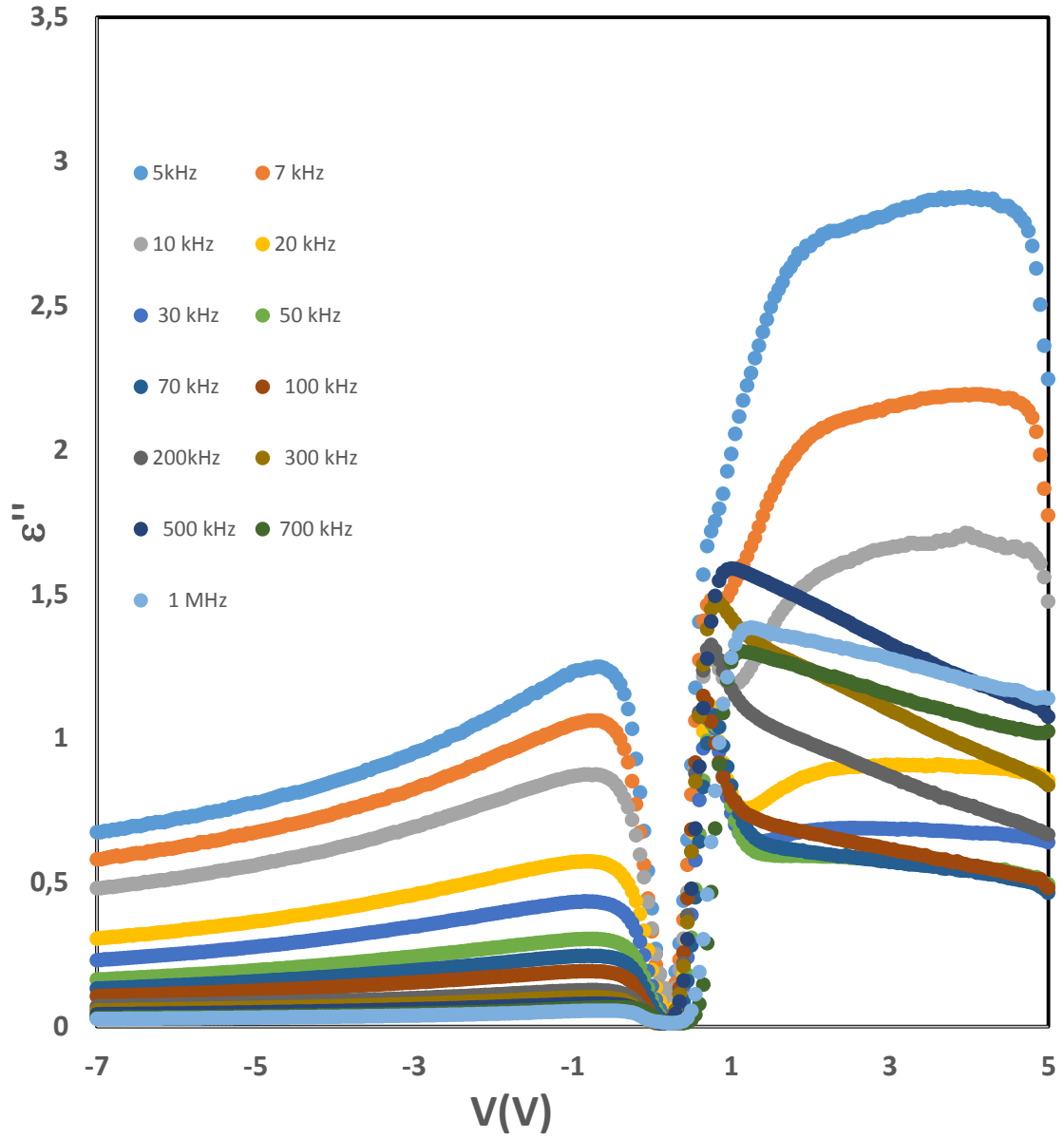
Denklem 4.23 ve 4.24'de görülen C_m ve G_m ifadeleri ölçtüğümüz kapasitans ve kondüktansı ifade eder. Sığa, kondüktans, ϵ' , ϵ'' parametrelerinin değerinin ideal şartlarda Kapasitans, kondüktans, ϵ' , ϵ'' parametrelerinin değerinin ideal şartlarda gerilim değişiminden etkilenmesi ama frekans değişiminden etkilenmemesi gerekir. Çünkü bu koşullarda seri direnç (R_s) ve arayüzey durumları (N_{ss}) yoktur. Fakat pratikte bunu yakalamak çok zordur. Üretim aşamasında kristal yapıda birtakım deformasyonların oluşması, diyotun yarıiletken katmanında yasak enerji bant aralığında kusurlar ve tuzakların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu şekilde ideal durumdan sapmalar olunca da cihazın C , G/ω , ϵ' , ϵ'' , vb. parametreleri gerilim ve frekans değişimlerinden etkilenir.

Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi Schottky diyodun ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$ değerleri sırasıyla 2.42, 2.43 ve 2.44 denklemleri yardımıyla farklı frekanslar için (-5V)- (7V) aralığında gerilime bağlı olarak hesaplanmış ve ilgili grafikler çizilmiştir (şekil 4.24, 4.25 ve 4.26).



Şekil 4.24 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda dielektrik sabiti (ϵ')'nün oda sıcaklığında voltaja göre değişim grafiği

Şekil 4.24'de görüldüğü gibi ϵ' değeri özellikle düşük frekanslarda daha büyük çıkmıştır. Ayrıca tersinim bölgesinde daha düşük frekanslarda pik oluşmuşken frekans değeri arttıkça bunun yok olduğu görülmektedir. Arayüzey durumları, seri direnç ve dipol polarizasyon frekansının daha küçük olduğu durumlarda ($f \leq 70$ kHz) bu piklere sebep olmuş olabilir.

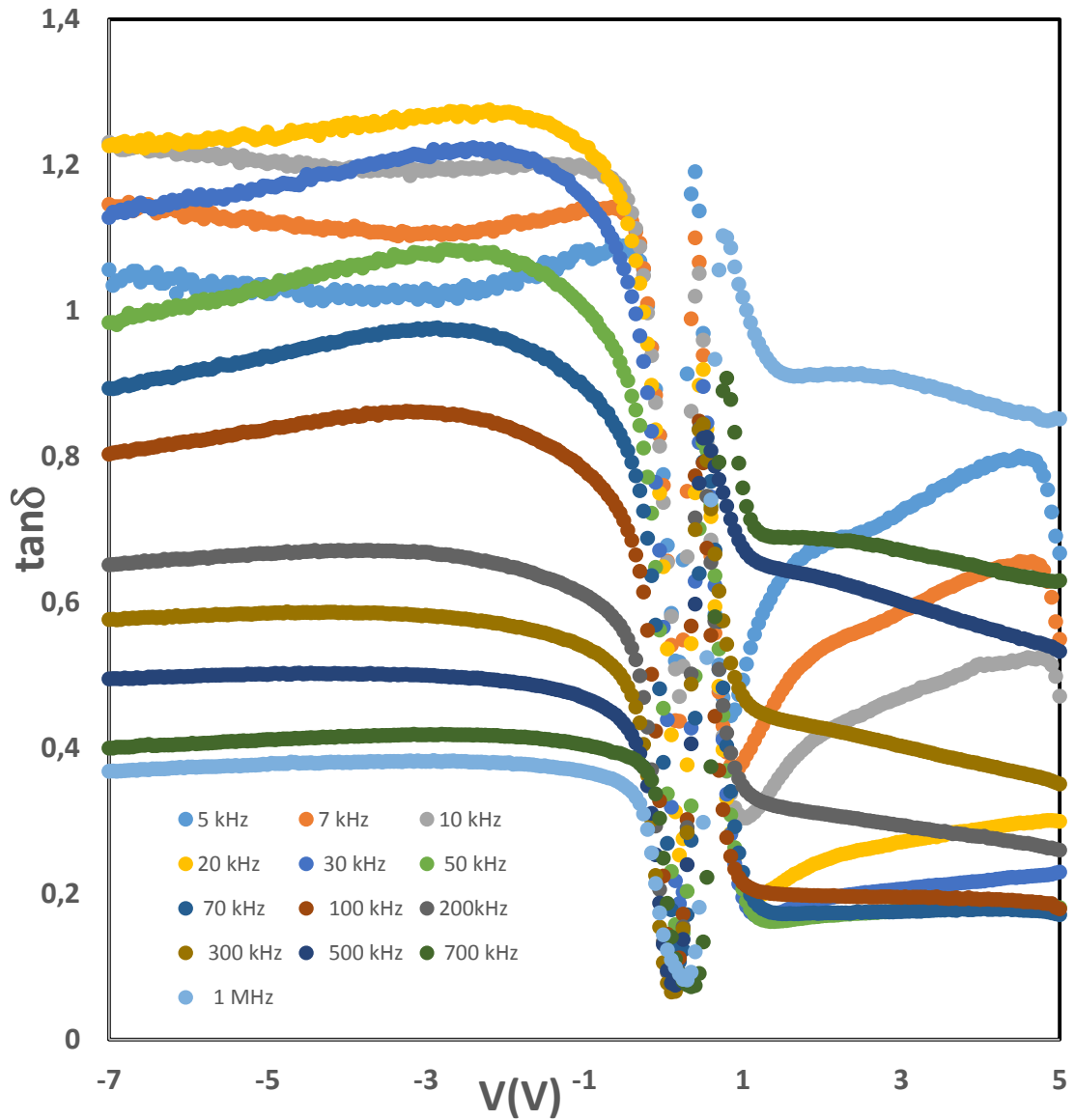


Şekil 4.25 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda dielektrik kayıp (ϵ'')'nün oda sıcaklığında voltaja göre değişim grafiği

ϵ'' - V grafiğini şekil 4.25'de gördüğümüz gibi tükenim bölgesinde düşük frekans değerlerinde pik oluşmuştur. Bu pikin oluşma sebebi yine arayüzey durumlarının (N_{ss}) oluşturduğu yasak enerji bant aralığındaki taşıyıcılardır. Oluşan bu pik frekans büyüdükçe büyük ön gerilim voltajına ilerler. Arayüzey polarizasyonu da tersinim bölgesi ile tükenim bölgesinde oluşan bu piklerin varlığına sebebiyet vermiş olabilir (Reddy vd. 2015, Tugluoglu vd. 2016). Şekil 4.21 ve 4.22'de görüldüğü gibi C ile G/ω değerleri frekansa göre farklılık göstermektedir. Bu demek oluyor ki farklı frekanslarda

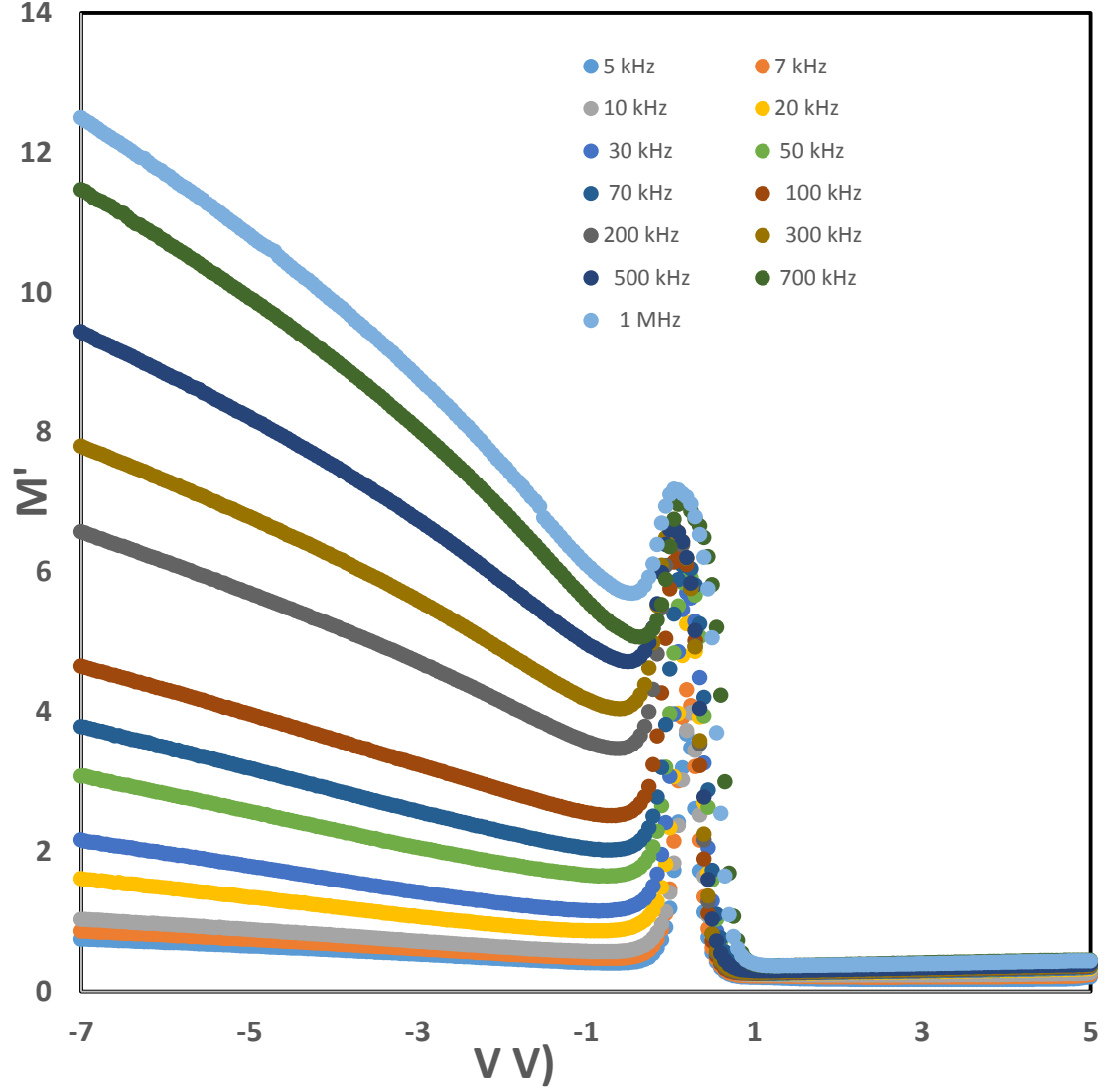
arayüzey durumları ve seri dirence aygıtın verdiği tepkiler değişir (Card ve Rhoderick 1971, Hackam ve Harrop 1972, Horvarth 1996, Reddy vd. 2015).

$\tan\delta$ - V grafiği aşağıda şekil 4.26'da verilmiştir. Şekil 4.21 ve 4.22'de görüldüğü gibi tersinim ve tükenme bölgesinde arayüzey durumları ve arayüzey polarizasyonu baskın olup, yığılma bölgesinde seri direnç ve arayüzey tabakası basındır.



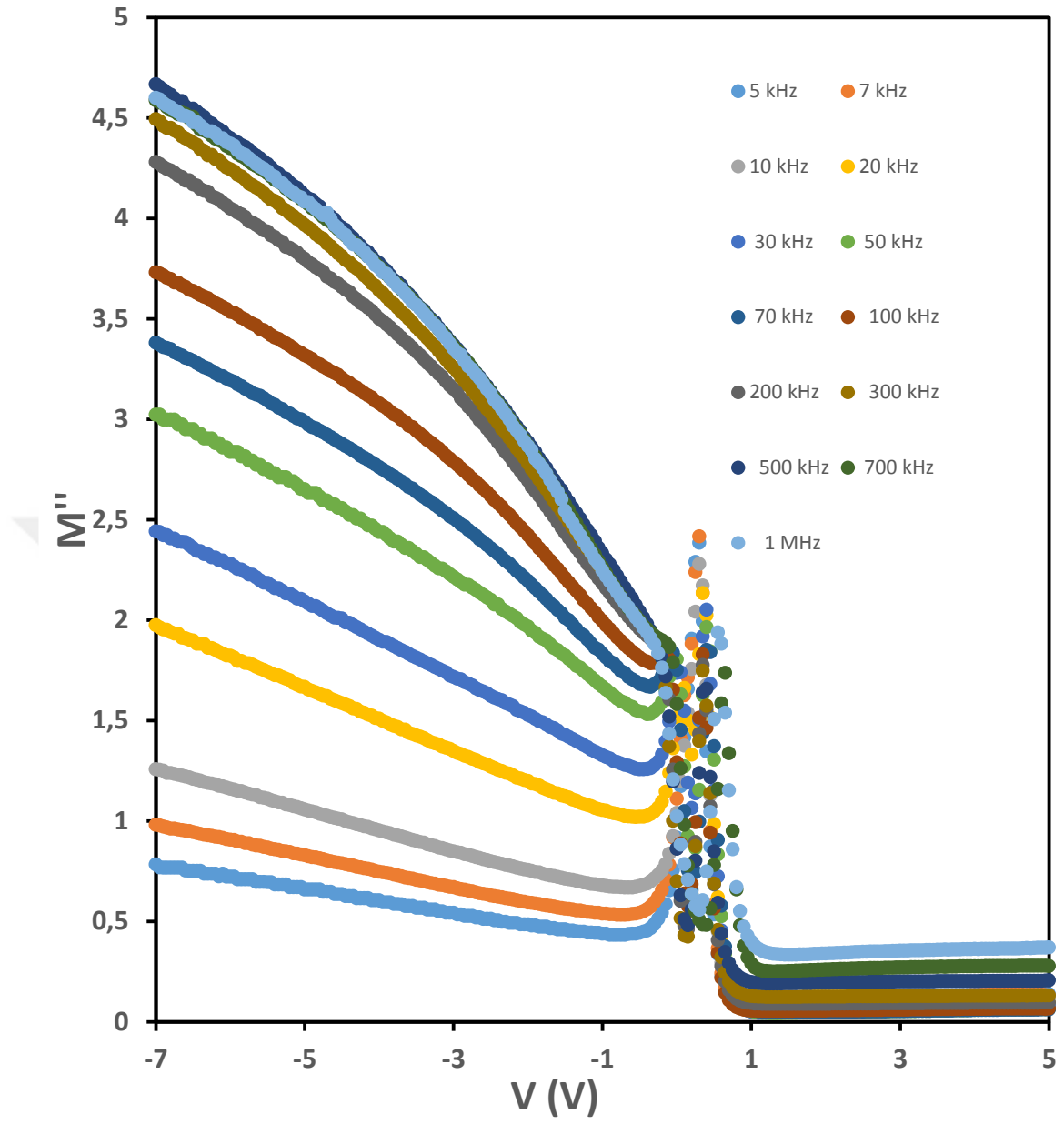
Şekil 4.26 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda oda sıcaklığında $\tan\delta$ -V grafiği

Dielektrik malzemelerin yapısını açıklayabilmek için kompleks elektrik modülüs (M^*) pek çok kez kullanılmıştır (Padovani 1966, Macedo vd. 1972, Bannov vd. 1995).

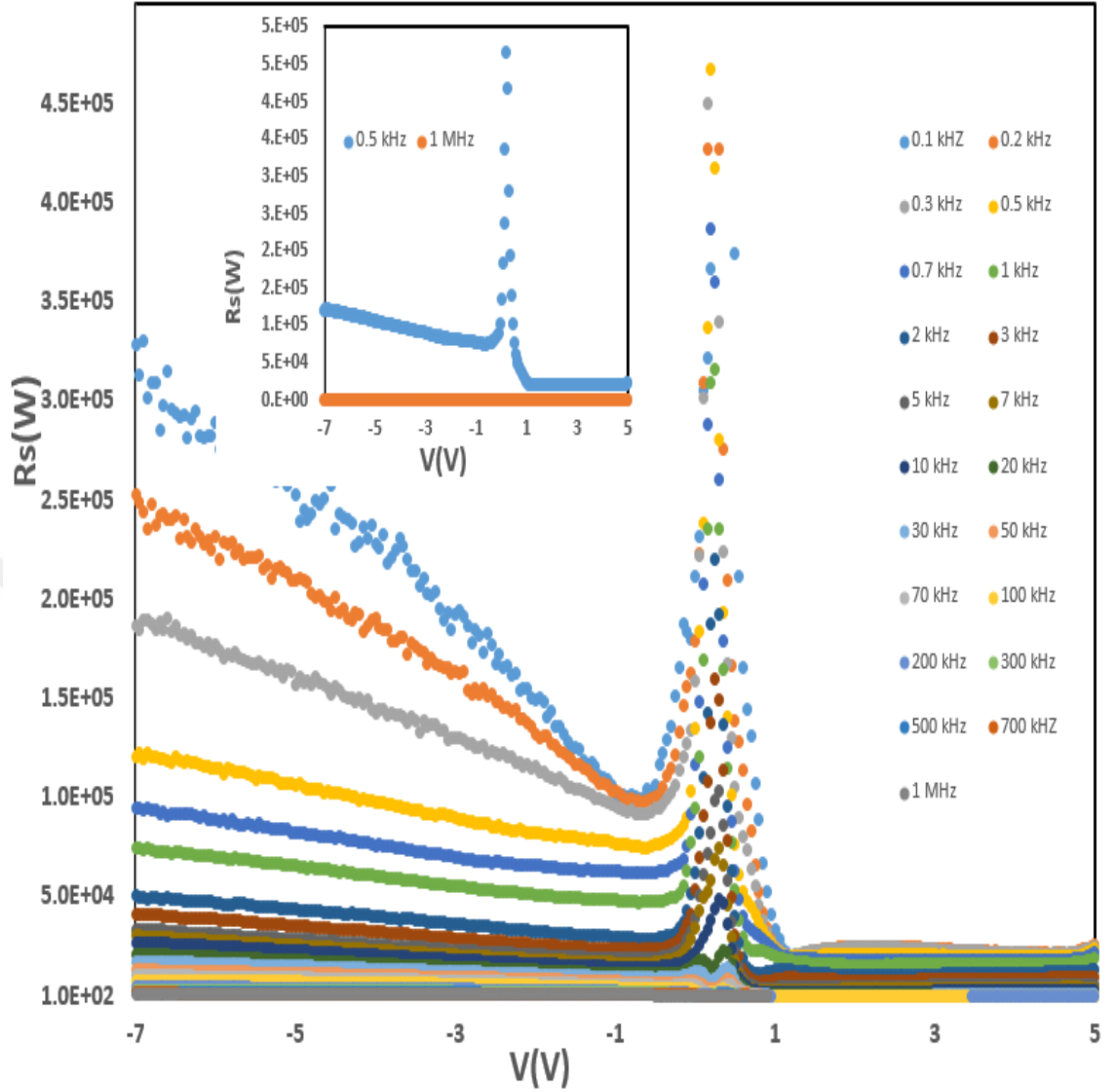


Şekil 4.27 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda farklı frekanslarda M' -V grafiği

Şekil 4.27 ve 4.28'de M' ile M'' 2.47 ve 2.48 denklemleri yardımıyla hesaplanıp gerilime karşı değişimleri farklı frekanslar için oda sıcaklığında çizilmiştir. Grafiklerden görülmektedir ki değerler tükenme ve yığılma bölgelerinde voltaja bağlı olarak daha çok değişim göstermiştir.



Şekil 4.28 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda oda sıcaklığında elektrik modülünün imajiner M'' parametresinin farklı frekanslarda gerilime göre değişimi



Şekil 4. 29 Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si (MPS) tipi diyotlarda $R_s - V$ değişimi

Yapının R_s değerleri 2.31 denklemi yardımıyla hesaplanmış ve R_s - V grafiği Şekil 4.27' de verilmiştir. R_s uygulanan gerilime çok bağlıdır. Şekilden görüldüğü gibi, R_s - V grafiği (-0,5V) - (-1V) aralığında pikler vermiş ve bu pikler artan frekansla küçülerek yerleri gerilimin negatif olduğu kısımlara doğru yer değiştirmektedir. Seri direncin bu şekilde bir değişim göstermesi yasak enerji aralığına yerleşmiş arayüzey durumlarının tekrardan düzenlenmesinden dolayıdır (Sze ve Kwok 2007, Card ve Rhoderick 1971).

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu doktora çalışmasında öncelikle Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlar hazırlanarak ölçümler alınmıştır. Amacımız metal (Al) ile yarıiletken (p-Si) arasına büyütülen malzemenin verimliliği arttırıp attırmayacağını gözlemlemektir. Laboratuvarımızda sol-jel yöntemiyle polimerik katman büyütürerek hazırladığımız Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda düz beslem akım – gerilim ölçümleri yapılarak sıcaklığa ve voltaja göre yapının elektriksel özellikleri incelenmiştir. Ölçümler sıcaklık olarak 80-320 K aralığında yapılmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde MPS yapının elektriksel parametrelerinin sıcaklık ve gerilime bağlı olarak değişim gösterdiği saptanmıştır.

Çalışmamızda ayrıca laboratuvarında hazırladığımız numunler haricinde bir de Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların da elektrik ve dielektrik özellikleri değişen sıcaklık ve frekansa göre doğru beslem ve ters beslem ölçümleri incelenmiştir. Sıcaklık aralığı olarak 60-320 K seçilerek akım-voltaj ölçümleri alınmıştır. Kapasite-voltaj, ve kondüktans-voltaj ölçümleri ise ~300 K civarında, 0.1 kHz – 1 MHz frekans ve (-5V) – (+7 V) voltaj aralığında 0.05 V adımlarla yapılmıştır.

Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlar ile Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların düz beslem I-V eğrisi eğrilerinden elde ettiğimiz bazı parametreler; I_0 ters doyum akımı, n idealite faktörü, Φ_{B0} metal-yarıiletken arayüzeyinde olduğu düşünülen bariyerin yüksekliği olup gerilime ve sıcaklığa göre oldukça değiştiği görülmüştür. TE teorisine göre beklenen idealite faktörünün 1 çıkması gerekirken sıcaklık arttıkça n değerinin her iki yapı için de artması burada bu teorinin kullanılamayacağı sonucunu doğurmuştur. Ayrıca bariyer yüksekliğinin de sıcaklık arttıkça azalması ve idealite faktörüyle ters orantılı değişmesi de bu durumun göstergesidir. İdealite faktörü sıcaklık arttıkça azalmakta ancak hiç bir zaman ideal durum olan 1'e eşit olmamaktadır. Yine her iki yapıda da Φ_{B0} 'ın değeri de artan sıcaklıkla lineer olarak artarken n ' in değeri de azalan sıcaklıkla neredeyse üstel olarak artmaktadır Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi diyotlar ile Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların sırasıyla 80 K' de $n=21,42$ $\Phi_{B0}=0,16$ eV, $n=9,85$, $\Phi_{B0}=0,25$ eV, 320 K'de $n=5,75$ $\Phi_{B0}=0,68$ eV, $n=2,06$, $\Phi_{B0}=0,83$ eV. Bu şekilde n 'in küçük Φ_{B0} 'ın ise büyük değerlere sahip olması (ZnS/

Fe₃O₄-PVA) polimerik ara katmanından kaynaklanan arayüzey durumlarına (N_{ss}), metal ile yarıiletken arasında oluşan bariyerin homojen olmamasına ve donör atomlarının katkılama seviyelerine bağlanmıştır. Özellikle idealite faktörünün bu değişiminden ötürü sistemin akım-iletim mekanizması olarak termoiyonik emisyon teorisi dışında başka teorilerin de düşünülmesi zorunlu olmuştur.

İdealite faktörünün sıcaklık değeri yüksek iken ideal durum olan 1'e eşit olamamasının nedeni metal ile yarıiletken arasında olduğu düşünülen potansiyel engelin küçülmesi veya metal ile yarıiletken arasına büyütülen polimerik katmanın arasında arayüzey durumları oluştuğuna işaret edebilir. Fakat sıcaklık, ölçüm yaptığımız en düşük değerlere ulaştığında idealite faktörünün idealden bu denli uzaklaşmış olmasının nedeni (Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar için 60 K'de $n=28,49$) farklı olmalıdır. Termoiyonik Alan Emisyonu ile Alan Emisyonu teorileri düşük sıcaklık bölgelerinde geçerli olabilir fakat bu teorilerin geçerli olması için yarıiletken malzemenin katkılanma oranının yüksek olması gerekmektedir ($N \geq 10^{18} \text{cm}^{-3}$). Başka bir deyişle TFE ve FE ancak dejenere yarıiletkenlerde geçerlidir. Bu oran yüksek olursa tünelleme ihtimali artar. Sıcaklık ve idealite faktörünün çarpımının sabit olması alan emisyonu teorisinin uygulanabilmesi için gereklidir. Fakat bizim numunelerimize ait I-V ölçüm sonuçlarından elde edilen idealite faktörüyle sıcaklık değerinin çarpımı değişkendir. Sonuç olarak FE teorisinin de kullanılamayacağı açıktır. Ayrıca $nkT/q - kT/q$ eğrisinin ideal durum için çizilen $kT/q - kT/q$ eğrisine paralel çıkmaması da T_0 etkili iletim teorisinin de geçerli olmayacağını gösterir. Grafiğin y-eksenini kestiği noktadan E_{00} tünelleme parametresi değeri Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar için 139.5 meV olarak bulunur. Bir yarıiletkende, tünelleme mekanizması sadece yüksek sıcaklık ve yüksek katkı seviyelerinde hakim olabilir. Bu nedenle, W_d 'nin değeri çok ince hale gelir ve böylece yüksek sıcaklıklarda bariyer yüksekliğinden birçok yük geçebilir ve n 'de bir artış meydana gelir. Ancak sonra, yüksek sıcaklıklarda, E_F 'den daha yüksek yeterli enerjiye sahip bu taşıyıcılar, bariyerden tünel açmadan yarı iletken den metale kolayca geçebilir.

Tünelleme mekanizmasının baskın olup olmadığı belirlenerek tünelleme parametresi (E_{00}) termal enerji (kT/q) ile karşılaştırılabilir. Tünelleme parametresi teorik olarak 1.05

meV olarak bulunmuştur. Bu değer, Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar için ölçüm yaptığımız en düşük sıcaklık olan 60 K' da bile kT/q ' dan çok daha düşüktür. E_{00} değeri, $n_{\text{tun}} - T$ grafiği fit edildiğinde deneysel değerine uydurularak ~ 160 meV bulunmuştur. Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar için ise fit denkleminde tünelleme parametresi $E_{00} \approx 80$ meV bulunmuştur.

Φ_{B0} -n grafiklerinde iki farklı eğime sahip lineer bölge görülmektedir. Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda 60 K – 140 K aralığı için $\Phi_{B01}=0,3925$ eV olarak bulunur. Aynı şekilde 160 K – 320 K aralığında da $\Phi_{B02}=1,0035$ eV bulunur. Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda ise 80 K - 180 K da $\Phi_{B01}=0,53$ eV 180 K- 320 K da $\Phi_{B02}=1,08$ eV olarak bulunur.

Benzer olarak $\Phi_{B0}-q/2kT$ ve $(n^{-1}-1) - q/2kT$ grafikleri de çizilmiş ve yüksek ve düşük sıcaklıklarda olmak üzere eğimleri farklı iki bölgeden oluştuğu görülmüştür. $\Phi_{B0}-q/2kT$ grafiğindeki iki eğrinin eğimlerinden Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda 60 K – 140 K aralığı için yani düşük sıcaklık bölgesinde $\Phi_{B0(\text{aver})} = 0.403$ eV $\sigma_s = 0.0557$ V, 160 K – 320 K aralığı için yani yüksek sıcaklık bölgesinde $\Phi_{B0(\text{aver})} = 0.983$ eV $\sigma_s = 0.136$ V olarak bulunur. Düşük sıcaklık bölgesinde ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla 0.8900 V ve 0.0008 V olarak elde edilir. Yüksek sıcaklık bölgesinde ise (160K – 320 K) ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla 0.07661 V ve 0.0041 V olarak elde edilir. Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda ise 80 K – 180 K aralığı için yani düşük sıcaklık bölgesinde $\Phi_{B0(\text{aver})} = 0.655$ eV, $\sigma_s = 0,082$ V, 200 K – 320 K aralığı için yani yüksek sıcaklık bölgesinde $\Phi_{B0(\text{aver})} = 1.326$ eV, $\sigma_s = 0.168$ V olarak bulunur. Düşük sıcaklık bölgesinde ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla -0.5820 V ve 0.0045V olarak elde edilir. Yüksek sıcaklık bölgesinde ise ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla -0.0195 V ve 0.0163 V olarak elde edilir. Bu iki bölge arayüzeyde oluşan Φ_{B0} 'ın Çift Gaussiyen Dağılım gösterdiğine işaret etmektedir.

Aynı şekilde yine klasik Richardson eğrisi de düşük ve yüksek sıcaklık olmak üzere iki farklı bölge içermektedir. $\ln(I_0/T^2) - q/kT$ grafiğinin her iki bölgesinin de fit denkleminde aktivasyon enerjisi ve A^* parametreleri bulunur. A^* 'ın fit denkleminde elde edilen değeri teorik olarak bilinen değerinden çok küçüktür. Richardson sabitinin

p-Si için teorik değer olan $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ 'dan çok küçük çıkmasının nedeni de metal - yarıiletken arayüzeyinde oluşan engelin heterojen olması sebebiyle olabilir. Aktivasyon enerjisi ise yüksek sıcaklıklarda daha yüksek iken düşük sıcaklıklarda oldukça düşük bulunmuştur. Bunun sebebi ise metal ile yarıiletkenin arayüzeyinde bariyerin çevresinde küçük tepeciklerin oluşması ve taşıyıcıların bu tepeciklerden kolayca geçebilmesidir.

Hazırladığımız Al/ZnS-PVA/p-Si ve Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi yapılarda akım iletim mekanizması bariyer yüksekliğinin çift Gaussian dağılım ile açıklanabileceğini Φ_{B0} -n, Φ_{B0} -q/2kT ve $(n^{-1}-1)$ -q/2kT çizimlerinden de görebiliriz. Bu doğrular ayrı ayrı fit edildiklerinde Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar için bulunan fit denkleminde düşük sıcaklık bölgesinde (60-140 K) Φ_{B0} 0.403 eV ve σ_{s0} 'da 0.056 V olarak elde edilir. Yüksek sıcaklık bölgesinde ise (160-320 K) Φ_{B0} 0.983 eV ve σ_{s0} 'da 0.136 V olarak elde edilir. Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda ise düşük sıcaklık bölgesinde (80-180 K) Φ_{B0} 0.655 eV ve σ_{s0} 'da 0.082 V olarak elde edilir. Yüksek sıcaklık bölgesinde ise (200-320 K) Φ_{B0} 1.326 eV ve σ_{s0} 'da 0.168 V olarak elde edilir. İki eğri için de elde edilen ve $\overline{\Phi}_{B0}$ 'dan küçük olan σ_{s0} değerleri bariyerin çevresinde oluşmuş engelicik (patika, tepecik) diye adlandırılan yapıların var olduğunu göstermiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda grafiklerin farklı eğimli bölgelerden oluşması yapıdaki yarıiletken kısmın katkılarının sonucu kimyasal değişime uğarmasına, bu sebeple arayüzeyde oluşan bariyerin heterojenleşmesine dayandırılmıştır (Crowell 1977, Horvarth 1996, Chand ve Kumar 1996, Soylu ve Yakuphanoglu 2010).

Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar için modifiye Richardson eğrisinde görülen düşük ve yüksek sıcaklık bölgeleri olarak ayrılmış lineer iki kısımdan yararlanılarak Φ_{B0} ve A^* değerleri bulunmuştur. Yüksek sıcaklık bölgesi için Richardson sabiti $A^* = 31,64 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ iken $\Phi_{B0} = 0.95 \text{ eV}$, HT için ise $A^* = 0.99 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve $\Phi_{B0} = 0.38 \text{ eV}$ olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere Richardson sabitin değeri yüksek sıcaklıklar için p-Si daha önceden teorik olarak bulunmuş olan $A^* = 32 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ değerine çok yakın olarak bulunmuştur.

Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarda ise düşük sıcaklık bölgesi için Richardson sabiti $A^* = 77.01 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ iken $\Phi_{B0} = 1.021 \text{ eV}$, yüksek sıcaklıklar için ise $A^* = 115.86 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve $\Phi_{B0} = 1.064 \text{ eV}$ olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere Richardson sabitin değeri yüksek sıcaklıklar için n-Si daha önceden teorik olarak bulunmuş olan $A^* = 112 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ değerine çok yakın olarak bulunmuştur.

(MPS) tipi Schottky diyotlarda $N_{ss} - (E_c - E_{ss})$ eğrilerinde arayüzey durumları olan N_{ss} 'nin sıcaklıkla ters orantılı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi sıcaklık artışıyla yeterli enerjiye sahip olabilen yüklerin tuzaklardan geçebilmesidir. N_{ss} değerleri $\sim 10^{13} - 10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ aralığında bulunmuştur. N_{ss} değerleri yani arayüzey durumları bütün sıcaklıklar için E_g dediğimiz yasak enerji bandının ortasından iletim bandının alt kademesine doğru eksponansiyel biçimde artış göstermektedir.

Sonuç olarak bu kısımda elde edilen veriler her iki (MPS) tipi Schottky diyotlarda iletkenlik mekanizmasının çift Gaussian dağılım ile ifade edilebileceğini kanıtlamıştır. Ayrıca yarı iletkenin yasak enerji bant aralığında varolan arayüzey durumları, yarıiletken katmanın üzerine büyütülen organik malzemedeki donör ya da akseptör atomların yoğunlukları, yapıdaki seri direnç, metal ve yarıiletken arayüzeyinde olduğu düşünülen bariyerin yüksekliği, şekli gibi pek çok parametre oluşturulan MPS yapının verimliliğini büyük ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışmanın ikinci kısmında Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si (MPS) tipi diyotlarda C-V ve G/ω -V ölçümleri 0.1 kHz – 1MHz frekans ve (-5V) – (+7V) gerilim aralığında yapılmıştır. Buradan bulunan kapasitans ve kondüktans değerleri kullanılarak da pek çok elektriksel ve dielektriksel parametreler hesaplanmıştır ve tüm parametrelerin frekansa bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Barış'ın (2013) yılındaki çalışmasında M/S yapılarda arayüzeye Sn, Zn, Cu, S vb. malzemelerin polimerle katkılanarak büyütülmesi durumunda ϵ değerlerinin arttırılıp yapının daha iletken hale gelebileceğini ifade etmiştir.

Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) tipi yapılarda kapasite-voltaj eğrilerinde frekans azaldıkça pikler belginleştiği görülmektedir. Uygulanan frekans değeri büyüdükçe pikler

küçülerek yığılma bölgesine ilerlemektedir. Bu durumun sebebi M/S arayüzeyinde oluşan N_{ss} ve seri direnç olarak düşünülmüştür (Werner ve Güttler 1991, Reddy vd. 2014). Frekansın daha düşük olduğu durumda, periyot (T) frekansla ters orantılı olduğu için tuzakta bulunan yüklerin yaşam ömürlerinden (τ) küçüktür ($T < \tau$). Bu sebeple yükler sinyal etkisiyle hareket etmeyi başararak kapasitans ve kondüktansta bir artışı sağlayabilirler. Frekansın daha yüksek olduğu durumdaysa arayüzey durumları AC sinyali izleyemez ve C veya G'yi arttıramaz.

$1/C^2$ -V grafiğinin lineer kısmının x ve y eksenlerini kestiği noktalar ile doğrunun eğiminden faydalanılarak bazı parametreler (V_0 , N_D , E_F , W_D , Φ_B , R_s) oda sıcaklığında ve farklı frekanslar (0,1 kHz – 1 MHz) için hesaplanmış ve frekansa bağlı olarak değiştikleri gözlenmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi N_D , R_s ve Φ_B frekanla ters orantılı, E_F ve W_D ise doğru orantılı olarak değişmektedir.

ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$ gibi bazı dielektriksel parametreler hesaplanarak voltaja bağlı grafikleri çizilmiştir. Dielektrik sabiti-gerilim eğrisinde görüldüğü gibi frekans daha düşük olduğu durumda ϵ' değerleri daha büyüktür ve tüketim bölgesinde pik oluşmuştur. Frekans değerinin arttığı durumda tüketim bölgesinde gözlenen pik yok olmaya başlamıştır. 50-70 kHz civarından sonra frekans arttıkça kaybolan bu piklerin sebebi dipol kutuplanma ya da arayüzey durumları olabilir.

ϵ'' - V değişimi izlenirken de pikler düşük frekanslarda daha belirgindir. Yasak bant aralığında arayüzey durumlarından kaynaklanan yük taşıyıcılar tükenim bölgesinde bu pikleri oluşturmuştur. Tükenme bölgesinde oluşan bu pikler frekans değeri yükseldikçe daha büyük öngerilim voltajında oluşur. Reddy vd. 2015 yılında yaptıkları çalışmada bu durumu Maxwell-Wegner türü arayüzey kutuplanmayla açıklamışlardır. Tersinim ve tükenim bölgesinde arayüzey durumları ve arayüzey kutuplanmasının baskın olduğu görülmektedir. Elde edilen grafiklerin tamamı bize farklı frekanslarda N_{ss} ve R_s 'nin yapıyı farklı etkilediğini ve piklerin de bu sebeple farklı uzunlukta ve farklı yerlerde çıktığını göstermiştir.

M' ve M'' – V grafikleri çizilerek kompleks elektrik modülünün farklı frekanslarda voltaja göre değişimi irdelenmiş ve bu değerlerin yapı üzerine uygulanan gerilime bilhassa tükenim bölgesinde bağlı olarak değiştiği saptanmıştır. Kompleks elektrik modülünün bu piklerin oluşması arayüze bölgesindeki tuzak yükler sebebiyledir.



KAYNAKLAR

- Alialy S. 2015. Au/TiO₂/n-4H-SiC (MIS) Diyotlarda Muhtemel Akım-İletim Mekanizmalarının Geniş Bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Arbatti, M., X., Shan, Z.Y. Cheng. 2007. Ceramic-polymer composites with high dielectric constant, *Adance Material*. 19, 3, 1369-1374.
- Badali, Y., Azizian-Kalandaragh, Y., Ehsan, A. Akhlaghi, Altındal, Ş. 2019. Ultrasound-Assisted Method for Preparation of Ag₂S Nanostructures: Fabrication of Au/Ag₂S-PVA/n-Si Schottky Barrier Diode and Exploring Their Electrical Properties, *Journal of Electronic Materials*, 49, 1, 444-453.
- Bannov, N., Aristov, V., Mitin, V., Schmitsdorf, R. E., Kampen, T. U., Mönch, W., Schmitsdorf, R. F. 1995. Correlation between barrier height and interface structure of Ag/Si (111) Schottky diodes. *Surface Science*, 324, 2, 249-256.
- Baraz, N., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh, Altındal, Ş. 2016. Determining electrical and dielectric parameters of dependence as function of frequencies in Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) structures, *Journal of Materials Science: Mater Electron*, 28, 2, 1315-1321.
- Baraz, N., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh Y., Ersöz, G., Orak, İ., Altındal, Ş., Akbari, B., Akbari, H. 2017. Electric and dielectric properties of Au/ZnS-PVA/n-Si (MPS) structures in the frequency range of 10–200 kHz, *Journal of Electronic Materials*, 46, 7, 4276–4286.
- Baraz, N., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh Y., Ersöz, G., Orak, İ., Altındal, Ş., Akbari, B., Akbari, H. 2017. Electric and dielectric properties of Au/ZnS-PVA/n-Si (MPS) structures in the frequency range of 10–200 kHz, *Journal of Electronic Materials*, 46, 7, 4276–4286.
- Baraz, N., Yücedağ, İ., Badali, Y., Azizian-Kalandaragh, Altındal, Ş. 2018. Determining electrical and dielectric parameters of Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) structures in wide range of temperature and voltage, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 15, 12735-12743.
- Barış, B. 2013. Frequency dependent dielectric properties in Schottky diodes based on rubrene organic semiconductor, *Physica E*, 54, 1, 171-176.
- Boughdachi, S., Badali, Y., Azizian-Kalandaragh, Altındal, Ş. Current-Transport Mechanisms of the Al/(Bi₂S₃-PVA Nanocomposite)/p-Si Schottky Diodes in the Temperature Range Between 220 K and 380 K. 2018. *Journal of Electronic Materials*, 47, 12, 6945-6953.

- Büyükbaş Uluşan, A., Tataroğlu, A., Y., Azizian-Kalandaragh, , Altındal, Ş. 2017. On the conduction mechanisms of Au/ (Cu₂O–CuO–PVA)/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes (SBDs) using current–voltage–temperature (I–V–T) characteristics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 1, 159-170.
- Card, H. C., Rhoderick, E. H. 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 4, 10, 1589-1595.
- Card, H. C., and Rhoderick, E. H. 1973. The effect of an interfacial layer on minority carrier injection in forward-biased silicon Schottky diodes. *Solid-State Electronics*. 16, 3, 365-374.
- Chand, S., and Kumar, J. 1996. Evidence for the double distribution of barrier heights in Pd₂Si/n-Si Schottky diodes from I-V-T measurements. *Semiconductor Science and Technology*, 11, 8, 1203-1208.
- Chattopadhyay, P., Halder, D. P. 1999. The DC characteristics of anisotype heterojunction in the presence of interface states and series resistance, *Applied Surface Science*, 143, 1, 287-300.
- Chelkowski, A. 1980. *Dielectric Physics*, Amsterdam: Elsevier, 1-396.
- Cowley, A. M., and Sze, S. M. 1965. Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36, 10, 3212-3221.
- Crowell, C. R., Rideout, V. L. 1969. Normalized thermionic-field (T-F) emission in metal-semiconductor (Schottky) barriers *Solid State Electronics*. 12, 89.
- Crowell, C. R. 1977. The physical significance of Toanomalies in Schottky barriers, *Solid-State Electronics*, 20, 3, 171-175.
- Dey, S. K. Baglar, S., Sarkar, D. 2016. Junction characteristics of ITO/PANI-ZnS/Ag and ITO/PANI-CdS/Ag Schottky diodes, *Indian Journal of Physics*, 90, 1, 29-34.
- Ejderha, K., Yıldırım, N., Abay, B., Turut, A. 2009. Examination by interfacial layer and inhomogeneous barrier height model of temperature-dependent I-V characteristics in Co/p-InP contacts. *Journal of Alloys and Compounds*, 484, 1-2, 870-876.
- Evcin Baydilli, E., Altındal, Ş., Tecimer, H., Kaymaz, A., Uslu Tecimer, H. 2020. The determination of the temperature and voltage dependence of the main device parameters of Au / 7% Grdoped PVA / n-GaAs-type Schottky Diode (SD). *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 31, 20, 17147-17157.

- Evcin Baydilli, E., Tan, S. O., Uslu Tecimer, H., Altındal, Ş. 2020. Detection of current transport mechanisms for graphene-doped-PVA interlayered metal/semiconductor structures. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 598, 412457.
- Evcin Baydilli, E., Kaymaz, A., Uslu Tecimer, H., Altındal, Ş. 2020. On the Multi-parallel Diodes Model in Au/PVA/n-GaAs Schottky Diodes and Investigation of Conduction Mechanisms (CMs) in a Temperature Range of 80–360 K. *Journal of Materials*, 49, 12, 7427-7434.
- Fonash, S.J., The role of the interfacial Layer in Metal–Semiconductor Solar Cells. *J. Appl. Phys.* 46:1286-1289 (1975).
- Gülnahar, M., Efeoğlu, H. 2009. Double barrier nature of Au/p-GaTe Schottky contact: Linearization of Richardson plot. *Solid-State Electronics*, 53, 9, 972-978.
- Gümüş, A., Ersöz, G., Yücedağ, İ., Bayrakdar, S., Altındal, Ş. 2015. Comparative study of the temperature-dependent dielectric properties of Au/PPy/n-Si (MPS)-type Schottky barrier diodes, *Journal of the Korean Physical Society*. 67, 5, 889–895.
- Hackam, R., Harrop, P. 1972. Electrical properties of nickel-low-doped n-type gallium arsenide Schottky-barrier diodes. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 19, 12, 1231-1238.
- Horvath, Z. J. 1988. Domination of the thermionic-field emission in the reverse I-V characteristics of n-type GaAs Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 64, 12, 6780-6784.
- Horvarth, Z. J. 1996. Analysis of I-V measurements on CrSi₂-Si Schottky structures in a wide temperature range -Comment. *Solid-State Electronics*, 39, 1, 176-178.
- Huang L., Wang D. 2015. Barrier inhomogeneities and electronic transport of Pt contacts to relatively highly doped n-type 4H-SiC. *Journal of Applied Physics*, 117, 204503.
- Hudait, M. K., Venkateswarlu, P., and Krupanidhi, S. B. 2001. Electrical transport characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge at low temperatures. *Solid-State Electronics*, 45, 1, 133-141.
- Janardhanam, V., Kumar, A. A., Reddy, V. R., Reddy, P. N. 2009. Study of current-voltage-temperature (I-V-T) and capacitance-voltage-temperature (C-V-T) characteristics of molybdenum Schottky contacts on n-InP (100). *Journal of Alloys and Compounds*, 485, 1-2, 467-472.
- Karataş, Ş., and Altındal, Ş. 2005. Analysis of I-V characteristics on Au/n-type GaAs Schottky structures in wide temperature range. *Materials Science and Engineering: B*, 122, 133-139.
- Kavasoglu, A. S., Yakuphanoglu, F., Kavasoglu, N., Pakma, O., Birgi, O., Oktik, S. 2010. The analysis of the charge transport mechanism of n-Si/MEH-PPV device

- structure using forward bias I-V-T characteristics. *Journal of Alloys and Compounds*, 492, 1-2, 421-426.
- Kaya, A., Tecimer, H., Vural, Ö., Taşdemir İ.H., Altındal, S. 2014. Capacitance/conductance-voltage-frequency characteristics of structures in wide frequency range, *IEEE Transaction Electronic Devices*, 61, 584-590.
- Kaya, A., Alialy, S., Demirezen, S., Balbaş, M., Yerişkin, S.A., Aytimur, A. 2016. The investigation of dielectric properties and ac conductivity of Au/GO-doped PrBaCoO nanoceramic/n-Si capacitors using impedance spectroscopy method. *Ceramics International*, 42, 2, 3322-3329.
- Levine, J. D. 1971. Schottky barrier anomalies and interface states. *Journal of Applied Physics*, 42, 10, 3991-3999.
- Macedo, P. B., Moynihan, C. T., Bose, R. 1972. Role of ionic diffusion in vitreous ionic conductor, *Physics Chemistr Glasses*. 13, 1, 171-179.
- Marıl, E. 2015. Au/(Ca₃Co₄Ga_{0.001}Ox)/n-Si Yapılarda Doğru ve Ters Beslem Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiklerinin 80-340 K Sıcaklık Aralığında İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Mott, N. F. 1938. Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34, 568-572.
- Neamen, D., A.. 1997. *Semiconductor Physics and Devices* 2nd ed. McGraw- Hill, New York, 420-450, 517-523.
- Nicollian E. H. and Brews J.R. 1982. *MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology*. John Willey and Sons, New York, 288 -304.
- Ozavcı, E., Demirezen, S., Aydemir, U., and Altındal, Ş. 2013. A detailed study on current-voltage characteristics of Au/n-GaAs in wide temperature range. *Sensors and Actuators A*, 194, 1, 259-268.
- Ozga, K., Michel, J., Nechyporuk, B.D., Ebothe, J., Kityk, I.V., Albassam, A.A., El-Naggar, A.M., Fedorchuk, A.O. 2016. ZnS/PVA nanocomposites for nonlinear optical applications, *Physica E: Low-Dimensional System Nanostructures*, 81, 281–289.
- Özdemir, F., Türüt, A., Kökçe, A.(2006). The double Gaussian distribution of barrier heights in Au/n-GaAs Schottky diodes from I-V-T characteristics. *Semiconductor Science Technology*, 21, 3, 298-302.
- Özden Ş., Avcı N., Pakma O., Kariper İ.A. 2022. emperature Dependent Current Transport Mechanism of Photopolymer Based Al NOA60 p-Si MPS Device. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 443.

- Padovani, F. A., Sumner, G. G. 1965. Experimental Study of Gold-Gallium Arsenide Schottky Barriers. *Journal of Applied Physics*, 36, 12, 3744-3747.
- Padovani, F. A. 1966. Graphical Determination of the Barrier Height and Excess Temperature of a Schottky Barrier. *Journal of Applied Physics*, 37, 2, 921-923.
- Pakma O., Serin N., Serin S.T., Altındal Ş. 2008. The double Gaussian distribution of barrier heights in Al TiO sub 2 p Si metal insulator semiconductor structures at low temperatures. *Journal of Applied Physics*, 104, 1, 14501.
- Parlakturk, F., Altındal, S., Tataroglu, A., Parlak, M., Agasiev, A. 2008. On the profile of frequency dependent series resistance and surface states in Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/n-Si (MIS) structures, *Microelectronic Engineering*. 85, 81-88.
- Rajagopal, Reddy, V., and Nanda, Kumar Reddy, N. 2012. Current transport mechanisms in Ru/Pd/n-GaN Schottky barrier diodes and deep level defect studies. *Superlattices and Microstructures*, 52, 484-499.
- Rajagopal Reddy, V. 2014. Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer, *Thin Solid Films*, 556, 1, 300-306.
- Reddy, R. V. 2015. Electrical and interfacial properties of Au/n-InP Schottky contacts with nickel phthalocyanine (NiPc) interlayer. *Indian Journal of Physics*, 89, 5, 463-469.
- Reddy, R. V., Munikrishna, Y., Padmasuvarna, R., Narasappa, T. Lakshmi Narasapa, T. 2015. Temperature-dependent electrical parameters and current transport mechanisms of Ru/Ti/n-InP Schottky diodes. *Indian Journal of Physics*, 89, 11, 1161-1168.
- Rhoderick, E. H. and Williams R. H. 1988. *Metal-Semiconductor Contacts* 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 257-264.
- Sattar, A. A., Rahman, S.A. 2003. Dielectric properties of rare earth substituted Cu-Zn ferrites, *Physics Status Solidi*, 415-422.
- Saxena, A. N. (1969). Forward current-voltage characteristics of Schottky barriers on n-type silicon. *Surface Science*, 13, 1, 151-171.
- Schmitsdorf, R.F. Kampen, T.U. Mönch, W. 1995. Correlation between barrier height and interface structure of Ag/Si (111) Schottky diodes. *Surface Science*, 324, 2-3, 249-256.
- Schmitsdorf, R. F., Kampen, T. U., Mönch, W. 1997. Explanation of the linear correlation between barrier heights and ideality factors of real metal-

- semiconductor contacts by laterally nonuniform Schottky barriers. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 15, 4, 1221-1226.
- Schottky, W. 1938. Halbleitertheorie de Sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 26, 1, 843-870.
- Schroder, D. K. 1998. *Semiconductor Material and Device Characterization* 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 337-379.
- Sedef, A. G. 2002. “Polipirol-Poliamid/Metal Eklemlerinin Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, 10-11.
- Shash, N.M., Khoder, H., Metawa, F., Negm, A.A. 2013. Structure, electrical, dielectric, and optical investigation on polyvinyl alcohol/metal chloride nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 29, 5, 2796-2805.
- Sharma, B. L. 1984. *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press, 1-3.
- Sharma, M., Tripathi, S. K. 2016. Frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/Al₂O₃/PVA:n-ZnSe Schottky barrier diodes, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 41, 155–161.
- Soylu, M., Yakuphanoglu, F. 2010. Analysis of barrier height inhomogeneity in Au/n-GaAs Schottky barrier diodes by Tung model. *Journal of Alloys and Compounds*, 506, 1, 418-422.
- Sze, S.M. 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd. Ed., pp.254-311, Willey-Interscience Publication, ABD.
- Sze, S. M., and Kwok, K. Ng. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*(3rded.). New Jersey: John Wiley & Sons, 362-390.
- Şafak-Asar, Y., Asar, T., Altındal, Ş., Özçelik, S. 2015. Investigation of dielectric relaxation and ac electrical conductivity using impedance spectroscopy method in (AuZn)/TiO₂/p-GaAs(110) Schottky barrier diodes, *Journal of Alloys and Compounds*, 628, 1, 442–449.
- Taşçıoğlu, İ., Soylu, M., Altındal, Ş., Al-Ghamdi, A.A., Yakuphanoglu, F. 2012. Effects of interface states and series resistance on electrical properties of Al/nanostructure CdO/p-GaAs diode, *Journal of alloys and compounds*, 541, 462-467.
- Tecimer, H., Türüt, A., Uslu, H., Altındal, Ş., Uslu, I. 2013. Temperature dependent current-transport mechanism in Au/(Zn-doped) PVA/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs). *Sensors & Actuators A: Physical*, 199, 1, 194-201.

- Tugluoglu, N., Koralay, H., Akgul K. B. 2016. Analysis of inhomogeneous device parameters using current-voltage characteristics of identically prepared lateral Schottky structures. *Indian Journal of Physics*, 90, 1, 43-48.
- Tunç, T., Altındal, Ş., Dökme, İ., Uslu, İ., and Uslu, H. 2011. Temperature Dependent Current-Voltage (I-V) Characteristics of Au/n-Si (111) Schottky Barrier Diodes with PVA (Ni, Zn-doped) Interfacial Layer. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14, 2, 139-145.
- Tung, R. T. 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physics Review B*, 45, 23, 13509-13523.
- Tung, R. T. 1991. Electron-transport of inhomogeneous schottky barriers. *Applied Physics Letters*, 58, 24, 2821-2823.
- Vafayi, L., S. Gharibe. 2013. Investigation of in vitro drug release from porous hollow silica nanospheres prepared of ZnS-SiO core-shell, *Bioinorganic Chemistry and Applications*, Article ID 541030.
- Vural, Ö., Şafak, Y., Altındal, Ş., and Turut, A. 2010. Current-voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range. *Current Applied Physics*, 10, 3, 761-765.
- Werner, J. H., Güttler, H. H. 1991. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69, 3, 1522.
- Yahia, I. S., Farag A. A., Yakuphanoglu, and F., Farooq, W. A. 2011. Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt. *Synthetic Metals*, 161, 9-10, 881-887.
- Zeyrek, S., Altındal, Ş., Yüzer, H., Bülbül, M. M. 2006) Current transport mechanism in Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Schottky barrier diodes at low temperatures. *Applied Surface Science*, 252, 8, 2999-3010.